INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición en español de **SCIENTIFIC AMERICAN**



TECNICA DEL ALMACENAMIENTO EN DISCO

Octubre 1980

250 PTAS.

Número 49
Octubre 1980



SCIENTIFIC AMERICAN

COMITE DE REDACCION Gerard Piel (Presidente), Dennis Flanagan, Brian P. Hayes, Philip Morrison, Francis Bello, Michael Feirtag, Judith Friedman, Paul W. Hoffman, Jonathan B. Piel, John Purcell, James T. Rogers, Armand Schwab, Jr., Joseph Wisnovsky

DIRECCION EDITORIAL Dennis Flanagan
DIRECCION ARTISTICA Samuel L. Howard
PRODUCCION Richard Sasso
DIRECTOR GENERAL George S. Conn

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR Francisco Gracia Guillén
REDACCION José María Valderas Gallardo (Redactor Jefe)
Carlos Oppenheimer
Encarna de Blas (Secretaria de Redacción)
PRODUCCION César Redondo Zayas
PROMOCION Y PUBLICIDAD Elena Sánchez-Fabres
PROMOCION EXTERIOR Pedro Clotas Cierco
EDITA Prensa Científica S.A.
Calabria, 235-239
Barcelona-29 (ESPAÑA)

Colaboradores de este número:

Asesoramiento y traducción:

Manuel Puigcerver: *La superficie de Venus;* Ana Cristina Villaro: *Microtúbulos;* Cristóbal Mezquita: *La placenta;* Ramón Pascual: *El electrón aislado;* Antonio Blanco: *Antecedentes de la civilización del valle del Indo;* Luis Roso: *Tecnología de las memorias de disco;* Juan-Pedro Acordagoicoecha: *La manzana de Newton y el Diálogo de Galileo;* Luis Bou: *Juegos matemáticos;* J. Vilardell: *Taller y laboratorio.*

Ciencia y sociedad:

Ramón Pascual

Libros:

Jesús Guinea, Luis Alonso y Jacinto Nadal



LA PORTADA

La ilustración de la portada muestra parte de un dispositivo que almacena datos para un sistema computador bajo la forma de zonas de magnetización en la superficie de un disco (véase "Tecnología de las memorias de disco", por Robert M. White, en este mismo número). El diámetro del disco mide 20,3 centímetros. Suspendida sobre él se encuentra una cabeza que no sólo magnetiza el disco, grabando por tanto los datos, sino que produce también un voltaje de lectura en respuesta a los campos magnéticos de los datos ya almacenados. La superficie visible en la ilustración puede almacenar hasta 2,67 millones de dígitos binarios, o bits. Hay otras tres superficies magnéticas (y otros tres cabezales) que no pueden apreciarse aquí. Cuando el dispositivo entra en funcionamiento, el conjunto gira a razón de 3125 revoluciones por minuto. El flujo de aire entre los discos y las cabezas genera entonces una fuerza aerodinámica que las hace "volar". El deflector forma parte del sistema de filtrado del aire (*abajo, a la derecha*).

Suscripciones:
Prensa Científica, S. A.
Calabria, 235-239
Barcelona-29 (España)
Teléfono 322 05 51 ext. 41

Condiciones de suscripción:
España:
Un año (12 números): 2.750 pesetas
Extranjero:
Un año (12 números): 43 U.S.$
Ejemplar atrasado ordinario:
280 pesetas
Ejemplar atrasado extraordinario:
420 pesetas

Distribución para España:
Distribuciones de Enlace, S.A.
Ausias March, 49, Barcelona-10

Distribución para los restantes países:
Editorial Labor, S. A.
Calabria, 235-239, Barcelona-29

Publicidad:
Madrid:
Gustavo Martínez Ovin
Avda. de Moratalaz, 137, Madrid-30
Tel. 430 84 81
Cataluña:
Miguel Munill
Balmes, 191, 2.°, 2.ª, Barcelona-6
Tels. 218 44 45 y 218 40 86

Controlado por O.J.D.



PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Dibujo de la portada de Ted Lodigensky

Página	Fuente
9-10	Ramón Margalef y Marta Estrada
11-20	Miguel Alonso
23	Donald B. Campbell
24-25	Walken Graphics
26-27	U.S. Geological Survey
28-29	U.S. Geological Survey (*izquierda*), Donald B. Campbell (*derecha*)
30-31	Donald B. Campbell
32-33	Walken Graphics
34	U.S. Geological Survey
36	Klaus Hausmann
37	Patricia J. Wynne
38	Manfred Schliwa (*arriba*) L. E. Roth (*abajo*)
39	Klaus Weber y Mary Osborn (*arriba*), Olav Behnke (*abajo*)
40	Patricia J. Wynne
41	Roger D. Sloboda (*arriba, abajo izquierda*), Helen Kim (*abajo derecha*)
42	Keigi Fujiwara y Lewis G. Tilney (*arriba*), Fred D. Warner y David R. Mitchell (*abajo*)
43	Bruno Bertolini y Gianni Monaco (*arriba*), Pierre Dustin (*abajo*)
44	J. Richard McIntosh (*arriba*), Jeremy D. Pickett-Heaps (*abajo*)
45	Patricia J. Wynne
46	Jan De Mey y Marc De Brabander
52	CERN
54	Lennart Nilsson, de *Behold Mand.* © 1974, Little, Brown and Company
56-60	Carol Donner
66-69	Gabor Kiss
70	George V. Kelvin
72-80	Gabor Kiss
83	Jean-François Jarrige
84	Andrew Tomko
85-87	Jean-François Jarrige
88	Ilil Arbel
89-90	Jean-François Jarrige (*arriba izquierda, abajo*), Ilil Arbel (*arriba derecha*),
92	Jean-François Jarrige
94-96	Allen Beechel
97	Allen Beechel (*arriba*), Tu Chen (*abajo*)
98-101	Allen Beechel
102	Neville Connell
103	Allen Beechel
106	Neil Newton
108-112	Thomas Fisher Rare Book Library, Universidad de Toronto
121	Jearl Walker
122-126	Michael Goodman

ISSN 0210-136X
Dep. legal: B. 38.999-76
Fotocomposición Tecfa
Guipúzcoa, 36 (local 1) Barcelona-20
Imprime Grafesa. Nápoles, 249
Barcelona-13
Printed in Spain - Impreso en España

Los autores

RAMON MARGALEF Y MARTA ESTRADA ("Las áreas oceánicas más productivas") son ecólogos. Margalef, que ha colaborado anteriormente en la revista, tanto como autor como en calidad de crítico de libros, dirige el departamento de ecología de la Universidad de Barcelona. Ha sido también director del Instituto de Investigación Pesqueras. La última aportación a su extensa bibliografía es el libro *La Biosfera* (Barcelona, 1980) en el que aplica conceptos de la teoría de juegos a la termodinámica ecológica. Acaba de concedérsele el premio Huntsman en su primera edición. Marta Estrada, nacida en Granollers (Barcelona), es colaboradora científica del Instituto de Investigaciones Pesqueras. Licenciada en biología en 1968 y en medicina en 1970, por la Universidad de Barcelona, se doctoró en biología por esa misma institución en 1976. Su línea de investigación se centra en el estudio del fitoplancton.

GORDON H. PETTENGILL, DONALD B. CAMPBELL y HAROLD MASURSKY ("La superficie de Venus") comparten su interés por la cartografía de superficies planetarias. Pettengill es profesor de física planetaria en el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT). Inició sus estudios en el MIT y realizó su trabajo de tesis doctoral en la Universidad de California en Berkeley, por la que obtuvo el doctorado en 1955. Ingresó entonces en el Laboratorio Lincoln del MIT, donde trabajó en el proyecto de radares de alta potencia para la detección de proyectiles balísticos intercontinentales. Este trabajo, dice, "le condujo naturalmente al campo de la astronomía de radar". Tras desempeñar durante algún tiempo la dirección del radiotelescopio de 300 metros del Observatorio de Arecibo, en Puerto Rico, Pettengill regresó al MIT en 1970 como miembro del departamento de ciencias de la tierra y del cosmos. Campbell es en la actualidad subdirector y jefe del grupo de astronomía de radar en el Observatorio de Arecibo. Nacido en Australia, estudió física y radioastronomía en la Universidad de Sydney. En 1965 se desplazó a Arecibo para trabajar con Pettengill por un año en el sistema de radar recién instalado allí. Finalizado el año, Campbell se trasladó a la Universidad de Cornell para terminar su trabajo de doctorado, tras el cual regresó a Arecibo. Masursky trabaja en la rama de estudios astrogeológicos del Servicio Geológico de los Estados Unidos en Flagstaff, Arizona. Se especializó en geología durante su licenciatura en la Universidad de Yale, antes de ingresar en el Servicio Geológico en 1951. Desde entonces ha tomado parte en múltiples proyectos de investigación terrestres y planetarios.

PIERRE DUSTIN ("Microtúbulos") enseña patología y dirige el departamento de patología y microscopía electrónica de la Universidad Libre de Bruselas, donde inició sus estudios de medicina en 1930. Tras la muerte de su padre, el patólogo Albert P. Dustin, en 1942, prosiguió la obra comenzada por éste sobre la acción antimitótica del alcaloide vegetal colchicina, que Albert descubriera ocho años antes. Ha publicado también diversos artículos sobre varios temas de la biología celular y patología.

PETER BEACONSFIELD, GEORGE BIRDWOOD y REBECCA BEACONSFIELD ("La placenta") son médicos británicos que han trabajado conjuntamente en el estudio de los efectos biológicos de algunos productos químicos utilizando la placenta humana como uno de sus "animales de experimentación". Peter Beaconsfield es director de la unidad de investigación que la comisión especial sobre contaminación interna tiene en la Universidad de Londres. Obtuvo dos grados doctorales por la Universidad de Londres: un doctorado en medicina (1944) y otro en fisiología (1953). Birdwood se graduó por la Universidad de Cambridge en 1953. Después de haber servido como oficial médico de la Armada, volvió a la vida civil para practicar la medicina general y escribir sobre temas médicos. Rebecca Beaconsfield, graduada por la Universidad de Londres, se especializó en anestesiología.

PHILIP EKSTROM y DAVID WINELAND ("El electrón aislado") empezaron a colaborar en el experimento que se expone en su artículo hace unos cuantos años, cuando se encontraban ambos en la Universidad de Washington. Ekstrom forma parte de la plantilla del observatorio de los laboratorios Batelle-Northwest en Richland, Washington, donde investiga en temas de astronomía y geofísica. Graduado en física por Washington, y en ciencias de computación por la Universidad de Cambridge, ha realizado algunos trabajos en electrónica industrial. Wineland se halla en el National Bureau of Standards en Boulder, Colorado. Se licenció en física por la Universidad de California en Berkeley y se doctoró por la de Harvard.

JEAN-FRANÇOIS JARRIGE y RICHARD H. MEADOW ("Antecedentes de la civilización del valle del Indo") son arqueólogos cuyo trabajo de campo está concentrado en el Oriente Medio y el Asia meridional. Jarrige, doctor en arqueología oriental por la Universidad de París, es director de la Misión Arqueológica Francesa en el Indo, la cual, en unión del Departamento Paquistaní de Arqueología, se ha venido ocupando, en las seis últimas campañas, de excavar los restos de una serie de poblados de agricultores primitivos establecidos en Mehrgarh, un yacimiento de la región de Beluchistán, en el Paquistán central. Meadow, que ha colaborado durante algunas de las últimas campañas con Jarrige en Mehrgarh, es licenciado en arqueología por la Universidad de Harvard. Se ocupa en particular del análisis de los conjuntos faunísticos de yacimientos arqueológicos y lleva a cabo un programa de análisis de fauna en el Museo Peabody de Arqueología y Etnología, de Harvard.

ROBERT M. WHITE ("Tecnología de las memorias de disco") trabaja en el centro de investigación de Palo Alto de la Corporación Xerox, donde estudia las propiedades físicas de los materiales. Graduado por el Instituto de Tecnología de Massachusetts, se doctoró en física por la Universidad de Stanford. Antes de entrar en la Xerox, en 1971, formó parte del profesorado de Stanford. Ha escrito la obra *Quantum Theory of Magnetism.*

STILLMAN DRAKE ("La manzana de Newton y el Diálogo de Galileo") estudió filosofía y matemáticas en la Universidad de California en Berkeley a comienzos de la década de los treinta. Hasta 1967 alternó su trabajo profesional como asesor de finanzas municipales en San Francisco con su afición por la obra de Galileo, publicando traducciones de sus obras científicas. Ese mismo año se incorporó al Instituto superior de Historia y Filosofa de la Ciencia y Tecnología de la Universidad de Toronto. Drake se jubiló en 1978 y es ahora profesor emérito de historia de la ciencia.

Hace...

José M.ª López Piñero

... trescientos años

Nació en Gerona Gaspar Casal, notable naturalista y el más importante de los clínicos españoles de la Ilustración. Su infancia la pasó en la localidad soriana de Utrillas, de donde procedía su madre. En 1713 obtuvo el grado de bachiller en artes en la Universidad de Sigüenza, desconociéndose si estudió medicina allí o en otra institución. En cualquier caso, ejerció en varios pueblos de la actual provincia de Guadalajara y pasó después a Madrid. Según propia declaración, abandonó la corte en 1717 por razones de salud, avecindándose en Oviedo. En la capital asturiana continuó dedicado a la práctica profesional cada vez con mayor prestigio y cultivó, entre otras, la amistad de Benito Jerónimo Feijóo. En 1751 volvió a Madrid, al ser nombrado médico supernumerario de la Real Cámara. Falleció ocho años más tarde.

La producción científica de Casal fue recogida en un volumen titulado *Historia Natural y Médica del Principado de Asturias,* publicado en 1762 por José García Sevillano, otro médico de cámara amigo suyo. Incluye seis escritos diferentes. En el primero de ellos ("Historia physico-médica del Principado de Asturias") se describe la geografía, el clima, la flora, la fauna de la región, así como las enfermedades más frecuentes en ella. El segundo refleja, ya desde su título, la orientación del "hipocratismo" de Casal: "Brevissimo tratado, en que con experiencias se declara, que para entender las importantes doctrinas, y sentencias de Hippocrates, valen más las observaciones prácticas, que la lectura, y estudio de los Comentadores de ellas". El tercer escrito es un estudio de las enfermedades epidémicas padecidas en Asturias durante tres años, realizado desde un enfoque ambientalista enteramente similar al utilizado por Sydenham; el cuarto, una exposición de algunas afecciones endémicas en la misma región; el quinto, la historia de un caso clínico

HISTORIA
NATURAL, Y MEDICA
DE EL PRINCIPADO DE ASTURIAS.

OBRA POSTHUMA,
QUE ESCRIBIO EL DOCT. D. GASPAR Casál, Medico de su Mageſtad, y su Proto-Medico de Caſtilla, Academico de la Real Academia Medica Matritenſe, &c.

LA SACA A LUZ
EL DOCT. JUAN JOSEPH GARCIA Sevillano, Medico de Familia del Rey nueſtro Señor, Ex-Examinador de ſu Real Proto-Medicato, Medico que ha ſido de los Reales Hoſpitales, y actual de el Real Sitio de Buen Retiro, Academico de la Real Academia Medica Matritenſe, y de la Real de Oporto, &c.

CON LICENCIA: En Madrid, en la Oficina de Manuel Martin, Calle de la Cruz. Año de 1762.
Se hallarà en la Libreria de Don Franciſco Manuel de Mena. Calle de las Carretas.

Portada de la edición póstuma de los escritos de Gaspar Casal



Esquema de las lesiones cutáneas propias de la pelagra. Lámina de la obra de Casal

y la correspondencia que, con motivo del mismo, cruzaron Casal y varias celebridades médicas parisenses, entre ellas Jean Astruc y Jean Louis Petit; el sexto y último, una breve monografía sobre el "succino", o ámbar, encontrado en Asturias.

Casal fue el más destacado seguidor, en la medicina española de la primera mitad del siglo XVIII, de la mentalidad antisistemática. Influido principalmente por el pensamiento de Francis Bacon y la obra médica de Sydenham, defendió una postura fundamentada en el "empirismo racional", es decir, en la observación clínica unida a los saberes básicos, especialmente la anatomía, la fisiología y descripción históriconatural del ambiente. Realizó valiosos estudios sobre el bocio endémico, la sarna, la lepra, el asma y otras afecciones. Sin embargo, su principal aportación fue la primera descripción clínica de la pelagra, que llamó "mal de la rosa":

"Aunque los síntomas de esta enfermedad sean diversos y suficientemente terribles, como se verá de lo que diremos más arriba, ello no obstante, su nombre vulgar proviene tan sólo de uno de ellos, y este síntoma consiste en una espantosa costra que, si recién salida no produce en la parte afectada más que rojez y aspereza, a la larga degenera en forma de costra muy seca, escabrosa, negruzca, entrecortada por frecuentes y profundas fisuras que, penetrando hasta la carne viva, producen gran dolor, quemazón y molestia.

"Para que esta costra maligna reciba el nombre de 'mal de la rosa' es condición tan precisa que se halle adherida a los metacarpos o metatarsos de manos o pies que a dolencia alguna de cualquier género, figura o condición, hase aplicado tal nombre en este país, a no ser que en las indicadas partes hubiese aparecido aquella costra. De suerte que, si en las plantas de los pies o en las plantas de las manos, en los codos, brazos, cabeza, cara, vientre, muslos o piernas, apareciese y persistiese rojez, aspereza, costra y aun erisipela (llamada "rosa" en otras regiones), a pesar de que a estos indicios se uniesen todos los síntomas que acompañan al 'mal de la rosa', no recibirían, con todo ello, el nombre de 'mal de la rosa' si las susodichas costras no hubiesen antes aparecido claramente en los metacarpos o los metatarsos. Importa, ahora, saber que las tales costras empiezan a manifestarse, las más veces, hacia el equinoccio de primavera, y raramente se manifiestan en las demás estaciones del año. Suelen desprenderse durante el verano, tal vez a causa de la humedad y del sudor, y entonces la parte afectada queda perfectamente limpia de toda pústula y costra, pero en el lugar que ellas ocupaban subsisten unos estigmas rojizos, característicamente lisos y brillantes, semejantes a las cicatrices que en pos de sí dejan las quemaduras, una vez curadas. De tal modo, que por más que el resto de la piel de los metacarpos y metatarsos sea áspera, arrugada y velluda, como acontece a menudo en las personas ancianas, aquella parte donde estaba la costra aparece limpia, tersa y sin arrugas, pero algo más rebajada o deprimida que la restante piel. Es verosímil que de este color rosado y esta brillantez de las cicatrices haya provenido la designación de 'mal de la rosa'.

"Esos estigmas, en personas fuertemente atacadas por el mal, persisten hasta el fin de la vida. Pero cada año, al llegar la primavera, la costra maligna, como la golondrina, vuelve a aparecer, porque es aniversaria. En aquellas personas en quien la enfermedad es reciente, las costras no son tan horrendas ni, después de haberse desprendido, dejan señal o cicatriz tan manifiesta. No siempre este mal alcanza a las dos manos; algunos enfermos presentan la costra sólo en una mano, otros en ambas, otros en ambas manos y en un solo pie, otros en ambas manos y ambos pies. No se propaga a las palmas ni a las plantas, sino que se mantiene en el dorso, ora de los pies, ora de las manos. Ocupa a veces todo el metacarpo o el metatarso, pero a veces se circunscribe a un espacio menor.

"Otro signo visible aparece en esta clase de enfermos, aunque no en todos, y es una aspereza costrosa de un color ceniciento oscuro en la parte anteroinferior del cuello que, a guisa de collar, se extiende de un lado a otro de la cerviz, sobre las clavículas del pecho y el mango o extremidad superior del esternón, de unos dos dedos de ancho, a manera de franja, y que, dejando a menudo intacta la parte posterior de la cerviz, alcanza tan sólo, en sus extremos, a los lados de ambos músculos trapecios, sin pasar más allá. En su parte central, un apéndice de igual anchura desciende sobre el esternón hasta la mitad del tórax, tal como en la figura se representa. Nunca pude hallar visible semejante indicio en persona alguna, sana o enferma, más que en sujetos aquejados del 'mal de la rosa', de lo cual infiero que se da únicamente en ellos, aunque no en todos."

La contribución nosográfica de Casal fue dada a conocer en Europa por el francés François Thiery, médico de cámara de Luis XIV, en 1751.

Las áreas oceánicas más productivas

Las áreas muy ricas en pesca, que habían hecho concebir esperanzas excesivas en los océanos como "reservas inagotables de proteínas", son muy limitadas. La mayor parte de la extensión de los mares es comparable a un desierto

Ramón Margalef y Marta Estrada

El desconocimiento engendra tanto temores injustificados como esperanzas excesivas; los progresos de la ciencia oceanográfica han ido disipando unos y otros en relación con los mares. Sólo algunos políticos y funcionarios poco enterados siguen refiriéndose a la despensa inagotable de los mares. Hoy día, los biólogos marinos saben mejor a qué atenerse. Lo que más ha contribuido a un conocimiento bastante preciso de la capacidad de producción de los mares fue la utilización, después de la segunda guerra mundial, del isótopo radiactivo de carbono, ^{14}C, como trazador para medir la capacidad de producción del plancton vegetal o fitoplancton. Este método, introducido por un científico danés, Steemann-Nielsen, fue rápidamente adoptado en todas las campañas de estudio; y así, se dispone actualmente de decenas de miles de determinaciones en estaciones y profundidades diversas de diferentes mares. Se pueden hacer algunas críticas al método, y más a la forma como a veces se emplea, pero no hay duda de que el conjunto de datos es comparable y coherente con otra información que se tiene acerca de la vida marina, como, por ejemplo, la cantidad de alimento necesaria para sustentar las poblaciones de animales, o el intercambio de gases, principalmente oxígeno y anhídrido carbónico, que se manifiesta por el cambio de sus concentraciones en el agua. Todas estas determinaciones se aplican a las aguas libres, pobladas por el plancton; en éste, los productores primarios son plantas microscópicas, unicelulares, pertenecientes a varios grupos de algas: dinoflageladas, diatomeas, cocolitoforales y pocos más. Dentro de estos grupos se pueden distinguir diferentes tipos biológicos, es decir, tipos de organización morfológica y funcional que muestran adaptaciones manifiestas a determinados géneros de vida.

Las algas del plancton sólo se pueden multiplicar donde llega luz suficiente, es decir, en las capas superiores del mar. Se puede aceptar que el espesor de la zona fótica o iluminada, donde hay un balance neto positivo de producción, es alrededor de dos veces la profundidad hasta la que puede verse un disco blanco, denominado disco de Secchi, que se sumerge en el agua. Dicha profundidad varía según los mares. En el Mediterráneo, la profundidad de visión del disco de Secchi alcanza hasta 45 metros y la fotosíntesis es positiva hasta un centenar de metros aproximadamente. Otros mares son menos transparentes, lo que es debido, en parte, a que contienen mucho plancton en suspensión. Las grandes algas costeras y praderas de plantas fanerógamas que cubren algunos fondos pueden ser impresionantes, pero contribuyen probablemente mucho menos del 5 por ciento a la producción primaria total de los mares.

Se puede ya cartografiar la producción primaria de los océanos [*véase la ilustración de la página 11*]; habitualmente se hace utilizando como unidades el número de gramos de carbono orgánico asimilado en una columna de agua debajo de un metro cuadrado de superficie y durante un año. Es fácil pasar a otras unidades si así se desea, por ejemplo, a calorías por metro cuadrado y año, utilizando, en este caso, como factor de conversión 1 gramo de carbono igual a 12 kilocalorías. Estas unidades de energía pueden ser convenientes o más demostrativas cuando deseamos comparar la energía utilizada en la síntesis de materia viva con la energía luminosa disponible. La relación es muy baja, lo que se puede interpretar, alternativamente, o bien como indicio de poca eficiencia de la biosfera, o bien de que la vida ha evolucionado, simplemente, en el sentido de gastar sólo la energía suficiente para mantener una cierta organización.

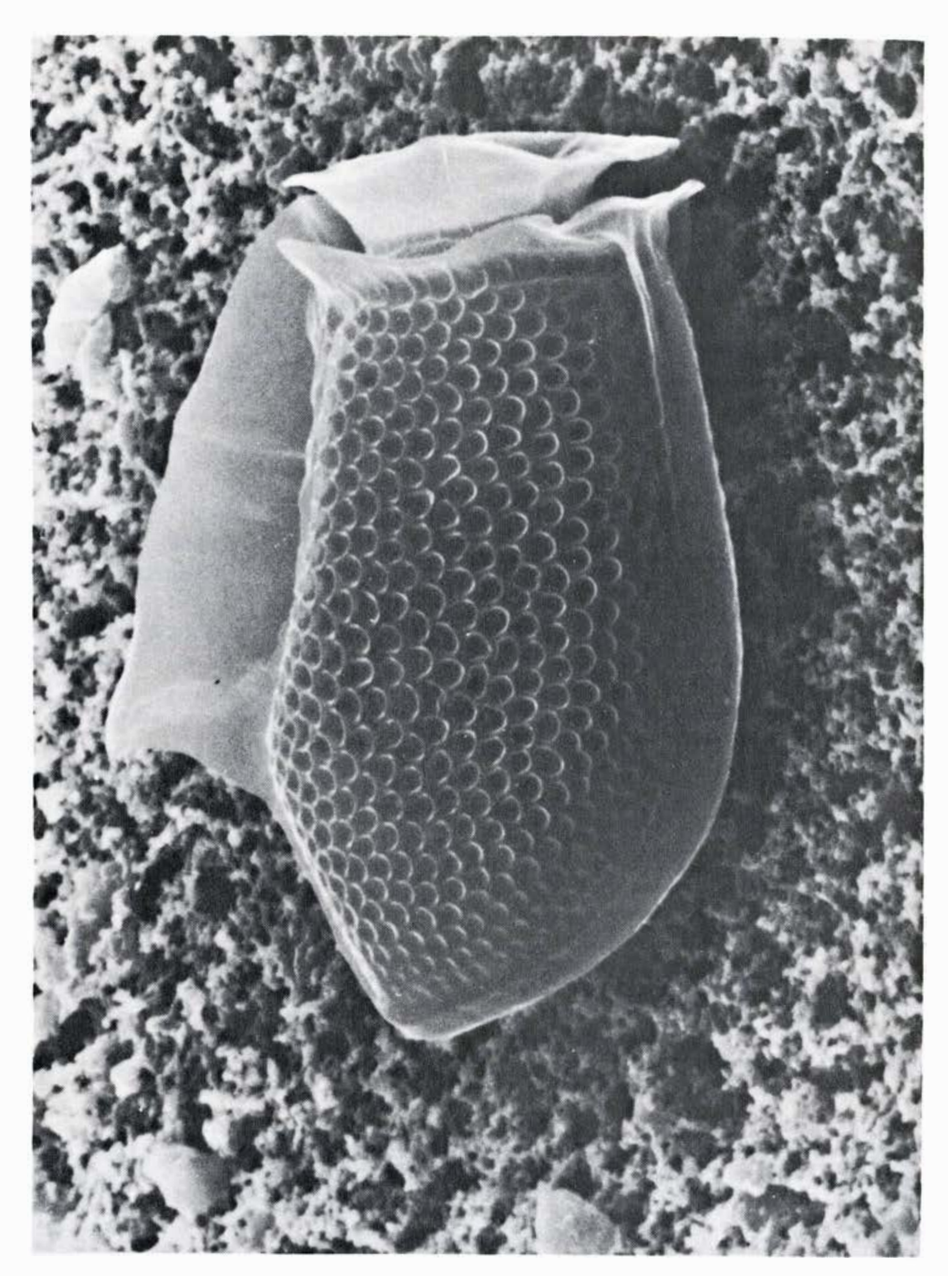
El estudio sinóptico de la producción marina ha llevado a identificar las áreas más fértiles. Pero su conocimiento no ha significado una aportación para resolver los problemas de la humanidad, porque todas las áreas en cuestión eran ya conocidas y generalmente bien explotadas por los pescadores. Se ha llegado a decir que el mejor indicador de la productividad marina es el número de embarcaciones de pesca por milla cuadrada; sin embargo, hay áreas potencialmente ricas que no son muy aprovechadas. El mejor ejemplo es la zona de los mares del Sur, que antaño alimentaba a las ballenas y que, ahora, una vez diezmadas las poblaciones de éstas posee un excedente de "krill". Con este nombre se designa un conjunto de pequeños crustáceos eufausiáceos, parecidos a gambas de pequeño tamaño, que comen fitoplancton y que, a su vez, eran pasto de las ballenas. Hoy se piensa seriamente en pescar el "krill" para preparar diversos alimentos, algunos de los cuales serían apetecibles para el consumo humano.

En general, las áreas más fértiles son aquellas en que el agua de profundidad es forzada hacia la superficie. Esta componente vertical en los movimientos del agua es conocida desde hace mucho tiempo con el nombre inglés de *upwelling,* que en castellano se traduce por afloramiento o surgencia. Una interpretación elemental del afloramiento es verlo como una consecuencia del efecto del viento que sopla junto a

la costa. Si el transporte neto de agua superficial determinado por el viento es aguas afuera, el agua que se aleja deja un espacio que es ocupado por agua procedente de mayor profundidad, con lo que se produce una especie de volteo del agua comparable al movimiento de la tierra al labrar un campo.

Para entender, a la vez, los efectos positivos del afloramiento y los bajos valores de producción en las áreas marinas donde no se da aquel fenómeno, hay que comentar brevemente los mecanismos biológicos básicos de la vida pelágica, es decir, de alta mar. Estos mecanismos nos han de explicar por qué la mayor parte de los océanos tienen una producción inferior a 75 y aún a 50 gramos de carbono por metro cuadrado y año que, con referencia a los ecosistemas terrestres, es típica de desierto, mientras que las áreas de afloramiento dan producciones de 300 a 500 y aún más gramos de carbono por metro cuadrado y año, lo que queda ya dentro de los límites de pastos y cultivos, cuando no de bosques, en los ecosistemas continentales.

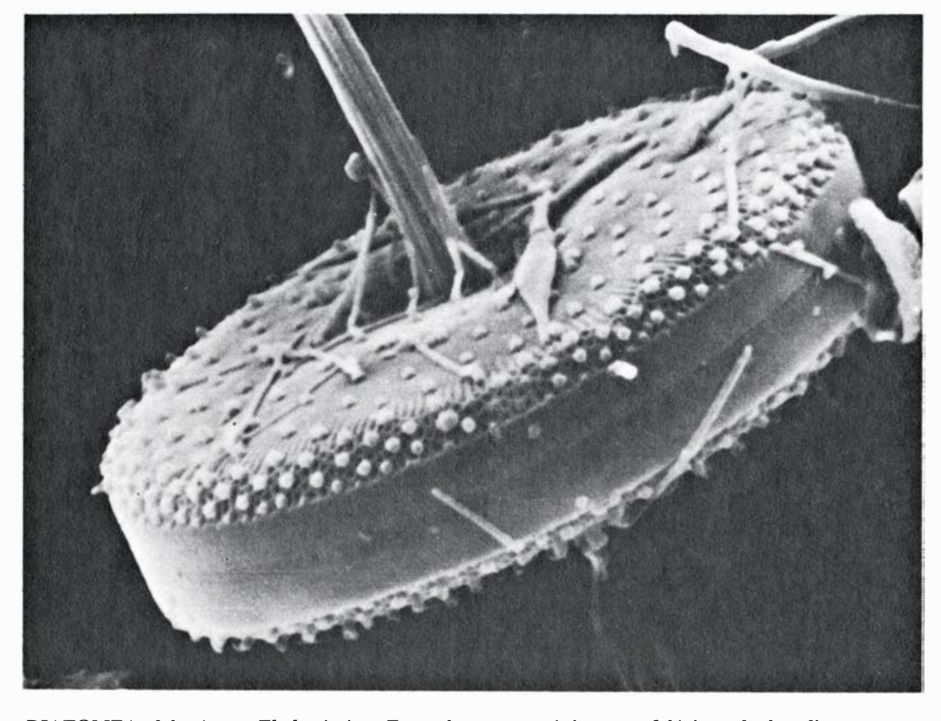
Es cierto que los ecosistemas pelágicos difieren considerablemente de los terrestres. En éstos tenemos plantas de gran tamaño, que persisten bastante tiempo en un lugar y que han desarrollado un sistema de transporte constituido por los vasos de sus raíces, tallo y hojas. La planta asimila nutrimento del suelo; más tarde, la planta es consumida por animales, o se despoja ella misma de sus hojas, que caen al suelo. Los elementos químicos de este material detrítico son liberados en las capas superiores del suelo, al que se incorporan, y son utilizados de nuevo por los vegetales. Lo esencial es que el ciclo se desarrolla en un espesor relativamente pequeño, del que sólo una mínima parte –el suelo– queda fuera de la luz. El caso del plancton es muy diferente. Los océanos son profundos, 4000 metros es su profundidad media, y sólo una delgada capa superficial, del 1/50 de aquel espesor, está suficientemente iluminada. No obstante, el ciclo de los elementos químicos biogénicos se desarrolla en todo el espesor del mar, lo cual actúa como un freno que retarda enormemente los procesos productivos. El mecanismo y alcance del asunto son fáciles de comprender. Cualquier átomo de un elemento esencial para la vida, sea fósforo, sea nitrógeno, sea cualquier metal, cuando pasa de estar en solución a estar en el cuerpo de un organismo, es decir, cuando pasa de estar en solución a estar en una partícula sólida mayor que un ion o una molécula, adquiere una probabilidad definida de moverse hacia abajo. Esto se debe a que la materia viva, en promedio, es más densa que el agua de mar y está sujeta a la acción de la gravedad. Todos los recursos en contra, como pueden ser la natación por medio de flagelos, o el mantenimiento de vacúolos o cavidades con un líquido de poca densidad, son recursos que requieren energía y su éxito sólo puede ser parcial. Los animales contribuyen también a este transporte hacia abajo. Con frecuencia se ha sugerido que la acción de los animales puede facilitar el reciclado de los elementos en las capas iluminadas. En efecto, los animales comen el plancton vegetal y excretan compuestos sencillos que quedan de nuevo a disposición de otras algas, en capas relativamente próximas a la superficie. Según las condiciones de lugar y tiempo este efecto tiene una importancia diferente; es un tema preferente de investigación estos últimos años y atestigua que los animales pueden reciclar dentro de la zona fótica una fracción de la producción primaria



DINOFLAGELADA del género *Dinophysis*. Las dinoflageladas típicas poseen un flagelo transversal y otro longitudinal, de distinta estructura y tamaño, que se insertan en la parte ventral del organismo y se alojan, respectivamente, en un surco transversal y otro longitudinal (bordeados por láminas en forma de orla en el *Dinophysis* de la fotografía). Si se exceptúan algunas formas desnudas, las dinoflageladas poseen una cubierta celular compleja. Predominan en el fitoplancton de aguas estratificadas y pobres, aunque en ciertos casos en que a la estratificación del agua se une un aporte suficiente de nutrimento pueden alcanzar densidades de población muy elevadas y dar lugar a las denominadas "mareas rojas".

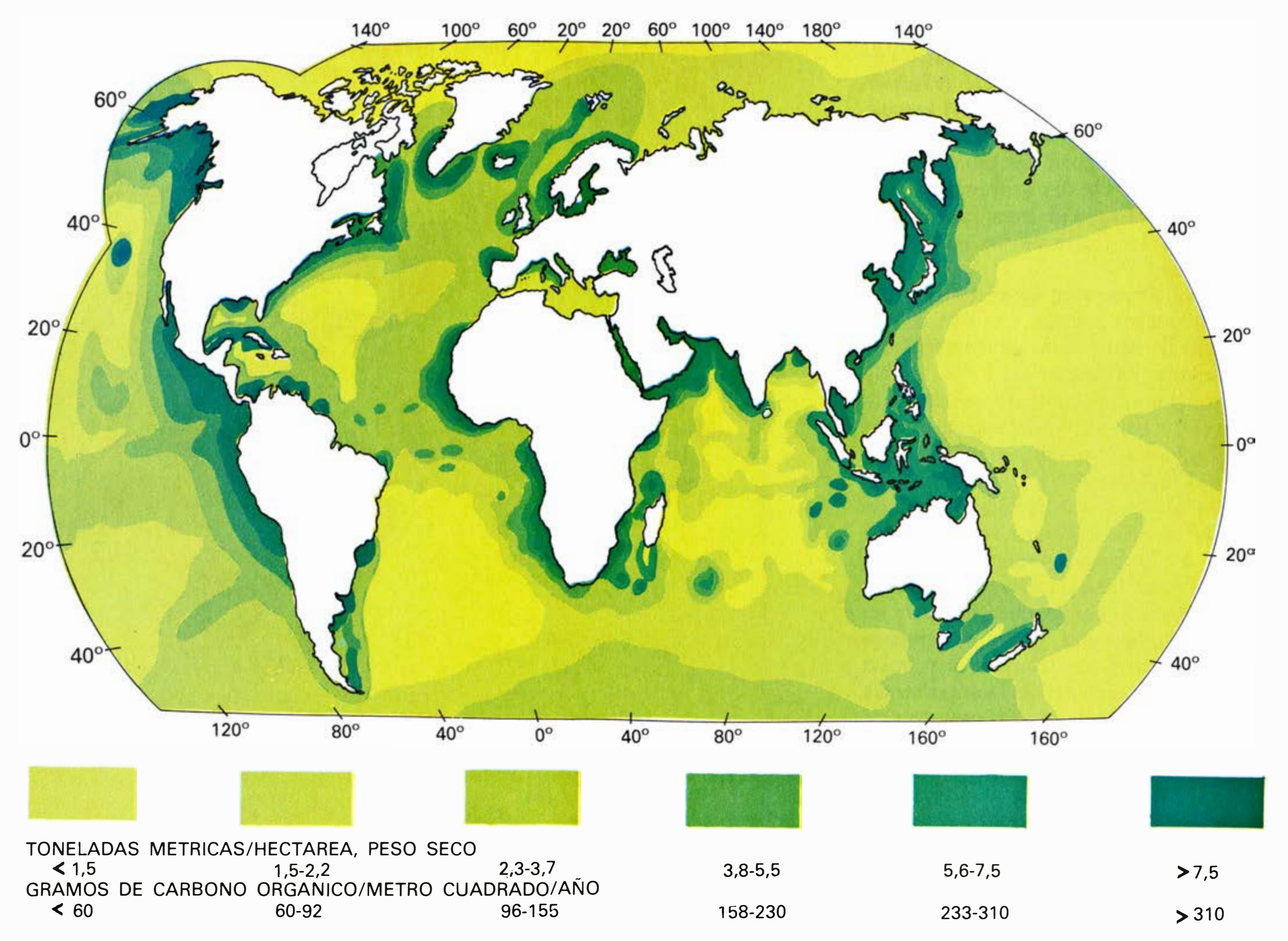
que con frecuencia alcanza entre el 25 y el 50 por ciento, raramente más. Pero el efecto de los animales, en todo caso, sólo puede retardar la fatal sedimentación del material producido. Es más, los propios animales aceleran hasta cierto punto el proceso de sedimentación y esto a través de dos mecanismos diferentes. De una parte, por la migración, y ello a través de dos mecanismos diferentes. De una parte, por la migraanimales migran alternativamente hacia arriba y hacia abajo, generalmente ascendiendo de noche y descendiendo de día. Puesto que la producción de fitoplancton se da en las capas más superficiales que reciben más luz, o en capas algo profundas, cuando las superficiales son tan pobres que en ellas plantas y animales nada tienen que hacer, el efecto neto de la migración vertical es que los animales comen más cerca de la superficie que del nivel medio al que defecan, lo que significa un transporte neto de material hacia abajo. A ello se suma un efecto muy peculiar de los copépodos, pequeños crustáceos que, según las áreas, forman del 20 al 80 por ciento del plancton animal. Los copépodos producen excrementos comprimidos, envueltos en una delicada membrana. Estos excrementos, cuya densidad es relativamente elevada, sedimentan a velocidades comprendidas generalmente entre 50 y 200 metros por día. En el curso de su viaje hacia los abismos, la membrana es atacada por bacterias, terminan por disgregarse y sus partículas finas se dispersan y siguen sedimentándose a velocidad menor. No conocemos las presiones de selección que han conducido a adoptar tal modalidad de comportamiento, pero lo cierto es que resulta una bendición para los organismos que se desarrollan a gran profundidad, pues, de otra manera, aún sería menor la fracción que les llegaría de la materia orgánica producida en las capas superiores.

El resultado neto de las mencionadas vías de asimilación y transporte en el ecosistema pelágico es muy simple. Los elementos químicos necesarios para la vida se transfieren continuamente de las capas superiores iluminadas a las capas profundas tenebrosas y se alcanza la segregación de los factores de producción. Donde hay luz, no quedan los elementos químicos necesarios para el crecimiento; donde el agua contiene en solución cantidades suficientes de fósforo y de los otros elementos necesarios, no hay luz. Podemos pensar que el retorno se podría establecer por difusión. Después de todo, se establece un gradiente intenso desde concentraciones altas a gran profundidad hasta concentraciones prácticamente nulas en superficie, de manera que el fósforo y los otros elementos se moverían de abajo arriba a favor del gradiente. Pero hay que recordar que la difusión molecular, en un líquido en reposo, no forzada por turbulencia alguna, es muy pequeña. Si los océanos no estuvieran agitados, si suponemos un planeta sin viento, o con una lámina de cristal que aislara el agua del aire, de forma que el retorno se debiera a simple difusión, la producción primaria de los mares sería aún mucho menor de lo que es actualmente y, posiblemente, descendería a menos de 5 gramos de carbono por metro cuadrado y año.



DIATOMEA del género *Thalassiosira*. Entre las características morfológicas de las diatomeas se encuentra su cubierta silícea o frústulo, formado por dos valvas, de simetría radial (como en el ejemplar de la fotografía) o bilateral. Las diatomeas presentan en general tasas de reproducción elevadas y predominan especialmente en el fitoplancton de aguas turbulentas y ricas en sales nutritivas.

Tanto por la ascensión directa de masas de agua profunda, como por la intensificación de la difusión introducida en la superficie en forma de turbulencia generada por el viento y las olas, retornan elementos nutritivos a la superficie y el ciclo de la vida marina se acelera en mayor o menor grado. En mayor grado, donde hay un transporte real de masas de agua profunda a la superficie; en menor grado, donde se trata simplemente de una agitación que se propaga hasta cierta profundidad. No se puede evitar la conclusión de que la fertilidad marina se relaciona mucho con la inversión local de energía de mezcla, mucha en las áreas de afloramiento, poca en otras áreas marinas. Estas consideraciones refuerzan la importancia de la noción de energía externa o extrasomática, energía procedente en términos generales de la interacción entre atmósfera y océanos, que potencia o hace efectiva la adquisición de energía interna o endosomática, que es la que entra en el ecosistema por la vía de la fotosíntesis, a la que nos hemos estado refiriendo continuamente como producción primaria. Generalmente, la importancia de los organismos en el control del ecosistema disminuye cuando aumenta la importancia de la energía externa. Podemos tener un atisbo del papel de dicha energía externa si pensamos en la agricultura, donde el hombre aporta energía en forma de trabajo, máquinas, fertilizantes y riego. De ordinario, el resultado es que el producto de las cosechas se relaciona estrechamente con dicho subsidio de energía externa. La fertilidad de los mares, en lo que concierne a la contribución de energía externa, nos aparece sustancialmente comparable con las circunstancias que existen en la agricultura y ambos tipos de relaciones han de parangonarse y reunirse dentro de una regularidad ecológica de tipo más general. La función de la ecología es, precisamente, formular este tipo de generalizaciones.



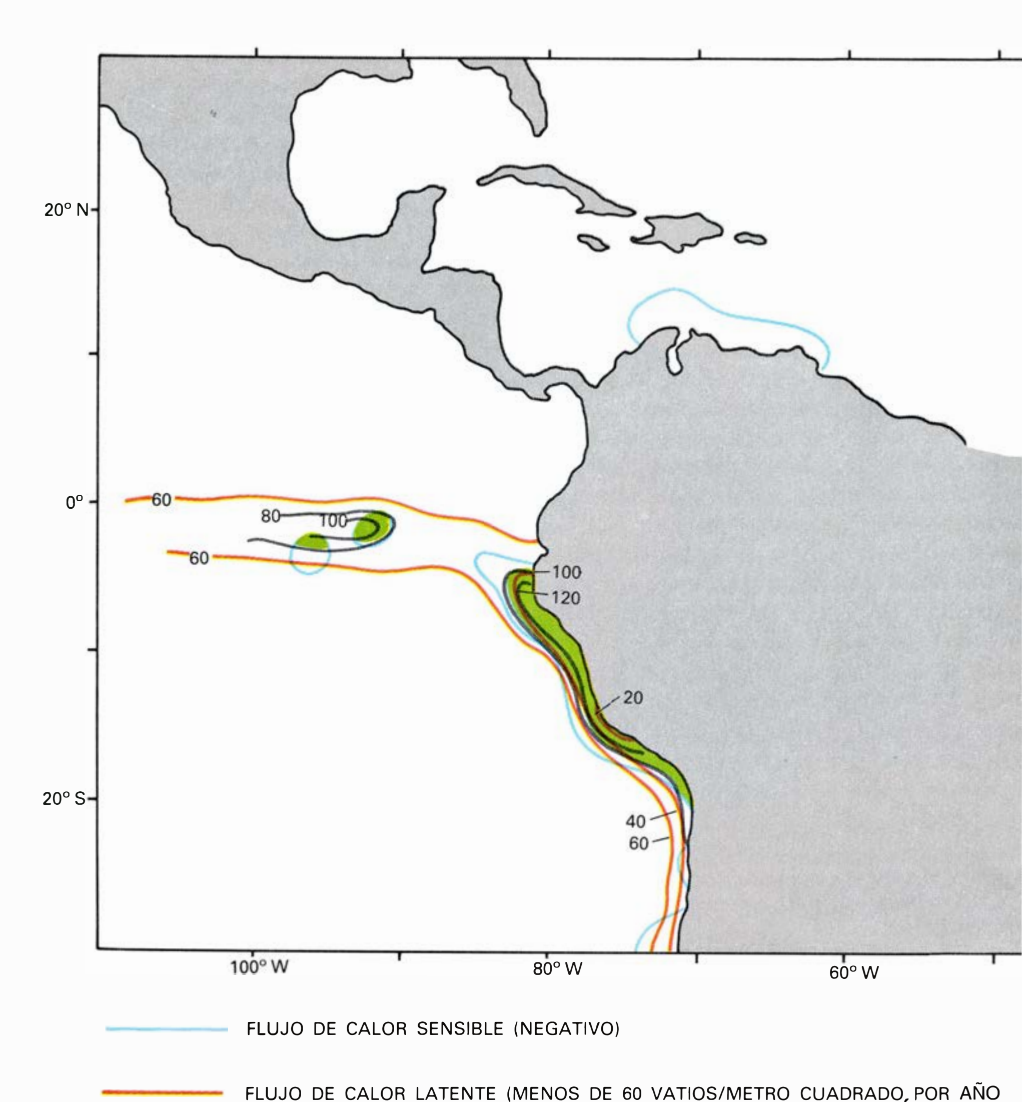
DISTRIBUCION MUNDIAL de la producción primaria de los océanos, en toneladas de materia orgánica seca por hectárea. También se indica la equivalencia en otras unidades de uso más corriente, aunque quizá menos intuitivo: gramos de carbono orgánico asimilado por metro cuadrado y año (leyendas inferiores). Datos tomados de Rodin y colaboradores, en *Productivity of World Ecosystems*, National Academy of Sciences, Washington, 1975.

Más adelante compararemos las áreas de afloramiento con los lagos eutróficos. En limnología, ciencia que estudia las aguas dulces, los lagos se ordenan según un eje cuyos extremos son la oligotrofia y la eutrofia. Los lagos oligotróficos son lagos de país salvaje, profundos, que se han estabilizado en condiciones de una producción relativamente baja; los lagos eutróficos son lagos muy productivos, principalmente por la acción del hombre. En efecto, lo que mantiene un lago eutrófico o lo hace eutrófico es la energía externa, energía del transporte en ríos, energía de explotaciones agrícolas que vierten el exceso de fertilizante en lagos o de áreas urbanas que aportan materiales [véase “Biología de los embalses”, Ramón Margalef, INVESTIGACION Y CIENCIA, octubre de 1976].

Parece tarea sencilla definir con cierta precisión la energía externa disponible en cada área marina y, según sea ella, anticipar la producción local esperada. Estos últimos años se han hecho grandes progresos en la comprensión de cómo repercuten sobre la producción primaria los mecanismos de circulación marina y las diversas modalidades de movimientos ondulatorios de las aguas. Sin embargo, es posible que todavía no hayamos comprendido claramente el problema. Hay otras vías de acceso. La energía utilizable localmente se podría deducir del trabajo realizado por la elevación, contra la gravedad, de masas de agua de densidad conocida, o por las diferencias en energía cinética de las corrientes marinas antes y después de un episodio de afloramiento, pero posiblemente también por medio del estudio de los cambios de calor a través de la superficie del agua. En efecto, si podemos cartografiar las formas como se cambia calor en un motor, probablemente podremos precisar bastante bien aquellos órganos donde se realiza trabajo, que serán los más calientes. En lo que se refiere a las áreas de afloramiento, en el mapa de las dos páginas siguientes se superponen varias curvas descriptivas de los cambios anuales de calor a través de la superficie de los océanos, según el atlas de Hastenrath y Lamb. Basta comparar dicho mapa con el que representa la producción primaria de los océanos, de esta misma página, basado en información totalmente independiente, para cerciorarse de las relaciones entre energía externa y productividad. Esta correspondencia tiene interés también desde otro punto de vista. Estos últimos años se ha hablado mucho y se ha dedicado un considerable esfuerzo a la supervisión y vigilancia de la biosfera desde el espacio, por satélites. En lo que se refiere a los ecosistemas marinos y a su productividad, la variable que ha parecido más adecuada para medir ha sido siempre la cantidad de clorofila, pero existen grandes dificultades, principalmente por la opacidad del agua a la radiación infrarroja y por la posición más o menos profunda, pero siempre

apartada de la misma superficie, de los niveles con la máxima concentración de clorofila. Si la producción se relaciona de manera muy directa con el cambio de energía y si éste es determinable de manera más segura, se tiene libre el camino para nuevos proyectos de detección del estado de nuestros ecosistemas y de las fluctuaciones en su productividad.

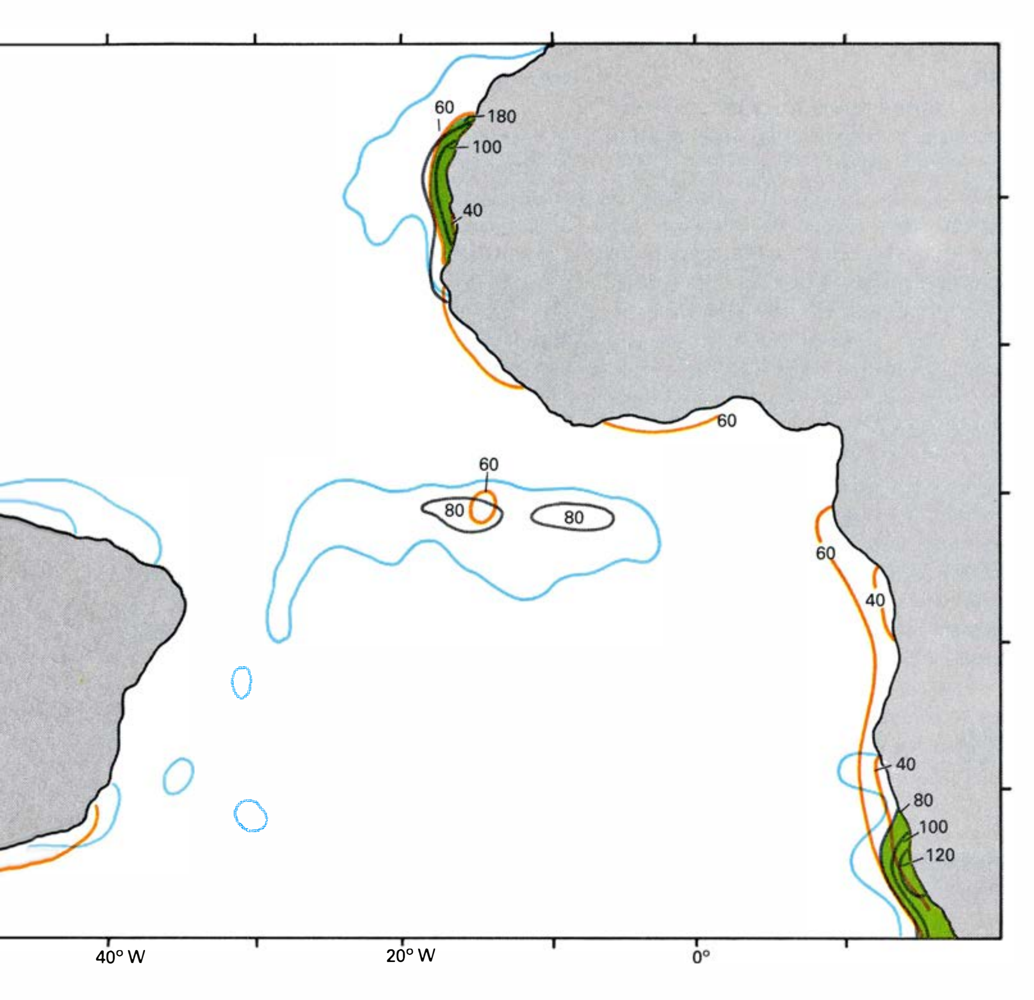
Especialmente en esta última década, el interés por las áreas de afloramiento ha estimulado el desarrollo de proyectos de investigación a escala nacional e internacional. Las investigaciones se han centrado especialmente en las costas de Oregón, California, Perú y Sahara. El sistema de afloramiento de las costas de Namibia ha sido menos atendido. Es una ventaja poder disponer de cuatro sistemas de afloramiento que tienen ciertas características comunes, por lo que permiten un estudio comparado, y, a la vez, poseen las suficientes características propias para poner en evidencia la importancia de factores diferentes. En cada una de estas zonas, sistemas de circulación oceánica, en forma de amplios circuitos o remolinos anticiclónicos en cada hemisferio, chocan y se deforman contra un continente sólido irregular. Quiere decir que enormes cantidades de energía cinética asociadas a los expresados circuitos realizan trabajo de alguna manera en las aguas costeras. Además del volteo hacia fuera de las aguas, que afecta principalmente a capas poco profundas, pues las aguas afloradas no proceden de más de 200 o aun de 100 metros de profundidad, se generan una serie de ondas de distintos tipos, que se propagan a lo largo de las costas complicando los movimientos del agua, pero disipándose finalmente en un aumento de la turbulencia y un aumento neto del retorno de los elementos a la zona fótica.



EL CAMBIO DE CALOR en la superficie del mar da idea de la estructura que tiene en el espacio la máquina térmica formada por los océanos y la atmósfera y, por tanto, de los lugares donde dicha máquina realiza ciertas formas de trabajo mecánico. En este mapa de una parte de los océanos Atlántico y Pacífico se superponen las áreas donde la ganancia neta de calor por el océano excede de 80 watt por metro cuadrado, donde el flujo de calor sensible es negativo (el agua del mar se calienta allí en

El problema fundamental, en el campo de la oceanografía física, consiste en delinear ciertas características de la circulación superficial que dependen de la ascensión de agua nutritiva. En primer lugar, el movimiento ascendente, que suele oscilar de pocos decímetros a algo más de un metro por día, es irregular en el tiempo y en el espacio. Los oceanógrafos hablan de "eventos" de afloramiento para referirse a los períodos de intensificación del movimiento ascendente del agua profunda, que se reflejan en un enfriamiento de las capas superficiales y en los correspondientes cambios en la distribución de densidades y de sales nutritivas. Estos períodos de intensificación duran típicamente varios días y obedecen, en gran parte, a cambios en el régimen local de vientos. El nombre de "plumas" de afloramiento se aplica a los casos en que el agua aflora en una zona relativamente limitada, de modo que, cuando se representa sobre un plano la distribución de temperaturas y otras propiedades hidrográficas o biológicas, las líneas que delimitan determinados valores de estos parámetros forman curvas, más o menos concentricas, alrededor del centro de afloramiento.

No obstante, hay que tener en cuenta que la discontinuidad, espacial o temporal, que implica hablar de plumas o eventos es solamente una aproximación cómoda para tratar de encerrar un continuo proteiforme. El efecto neto del afloramiento es introducir cierta cantidad de fósforo, de nitrógeno, de silicio y de otros elementos, en la zona fótica. Pero el agua aflorada ha de dispersarse horizontalmente y ha de organizar cierto motivo de celdas de circulación y de remolinos, con remolinos menores intercalados entre otros más grandes [*véase la ilustración de la página 18*]. Semejante estructura celular ha sido reconocida en las áreas de afloramiento y se considera esencial para entender su biología. En efecto, el nutrimento inyectado en la zona iluminada es reciclado varias veces antes de dispersarse, y el reciclado se organiza frecuentemente en torno de las mencionadas celdas de circulación. Por esta razón, pueden aparecer capas o lentejones sumamente empobrecidos en oxígeno en el núcleo de celdillas de circulación; dichas masas de agua determinan fenómenos espectaculares (muerte de peces, ennegrecimiento de la pintura de



GANANCIA NETA DE CALOR POR EL OCEANO (MAS DE 80 VATIOS/METRO CUADRADO,POR AÑO)

COINCIDENCIA, AFLORAMIENTO

superficie, o al pasar a la superficie) y el flujo de calor latente (el calor invertido en evaporar el agua), es inferior a 60 watt por metro cuadrado. Estos datos se refieren al promedio anual y están sacados del atlas de Hastenrath y Lamb (*Heat Budget Atlas of the Tropical Atlantic and Eastern Pacific Oceans*). Las áreas de afloramiento poseen un elevado cambio de energía que, en punto a característica sensibles del agua, se manifiesta en un calentamiento considerable y una evaporación relativamente baja.

los barcos) cuando se mueven hacia la costa.

Una estructura tan heterogénea como la que se encuentra en las regiones de afloramiento tiene su reflejo en la distribución de los organismos. A pesar de su mezcla intensa y continuada, las poblaciones de plancton no son uniformes, porque se multiplican y diferencian a mayor velocidad aún que su mezcla por procesos hidrográficos. Precisamente un estudio detallado del comportamiento de las poblaciones de plancton vegetal en las áreas de afloramiento nos llevará a establecer relaciones muy significativas entre las características del fitoplancton y las condiciones locales de movimiento y turbulencia del agua. En este sentido, las zonas de afloramiento, por ser de mucho contraste, especialmente si se incluyen en el estudio las áreas periféricas, ilustran excelentemente un capítulo muy importante de la biología marina, la correspondencia entre los tipos biológicos de las algas planctónicas y las condiciones del medio bajo las cuales son seleccionados.

Los ejemplos que aquí se presentan se basan en las observaciones realizadas durante campañas de estudio del buque "Cornide de Saavedra" en el área de afloramiento de las costas del Sahara, pero en las costas de California o del Perú se obtienen resultados sustancialmente coincidentes. Investigaciones recientes de uno de los autores (Estrada) en la costa de California apoyan sustancialmente las conclusiones que aquí se presentan.

Los datos originales consisten en recuentos de las células del fitoplancton, clasificadas por especies, de muestras obtenidas en diversas profundidades y estaciones, durante dos campañas, realizadas, una en agosto-septiembre de 1971 y la otra, en marzo de 1973. Estos datos se condensaron en una primera etapa fusionando las distintas estaciones incluidas en varias zonas geográficas con plancton de características muy uniformes: para cada profundidad de muestreo se hizo un promedio de las abundancias de cada especie en todas las estaciones incluidas en cada zona. Con ello, se obtuvo una serie de muestras compuestas, correspondientes a distintas profundidades dentro de cada zona geográfica.

La siguiente etapa consistió en la realización de un análisis estadístico multivariable de la distribución de un conjunto de 33 especies o grupos de especies. Es una proporción pequeña del conjunto (se reconoció la presencia de más de 300 especies distintas de vegetales planctónicos), pero incluye las más abundantes y difundidas y, a juzgar por otros estudios, los resultados se pueden considerar como típicos de lo que el procedimiento permite. El método estadístico utilizado fue el análisis de los componentes principales, basado en la matriz de los coeficientes de correlación entre las abundancias (después de transformación logarítmica) de las distintas especies tomadas dos a dos.

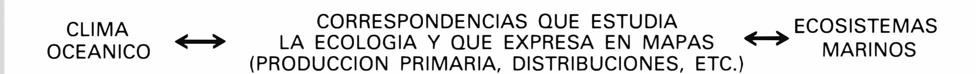
Desde luego, este procedimiento tiene ciertas limitaciones, lo mismo que los demás métodos de análisis multivariable, pero su empleo cuidadoso proporciona resultados muy útiles. Los componentes principales son unas nuevas variables, que se obtienen sucesivamente en el análisis como combinación lineal de las variables iniciales. Tienen dos propiedades importantes. Son incorrelacionados entre sí y la proporción de la variancia (una medida de la variabilidad) de los datos explicada por cada componente sucesivo es máxima. Cada componente principal corresponde a una dirección de variación en el conjunto de datos a la que contribuyen, en grado diverso, las distintas especies. El método permite resumir en unas pocas dimensiones importantes, representadas por los primeros componentes, la mayor parte de la variabilidad contenida en los datos iniciales. En nuestro ejemplo, consideraremos solamente los tres primeros componentes, que explican, en conjunto, el 53 por ciento de la variancia total.

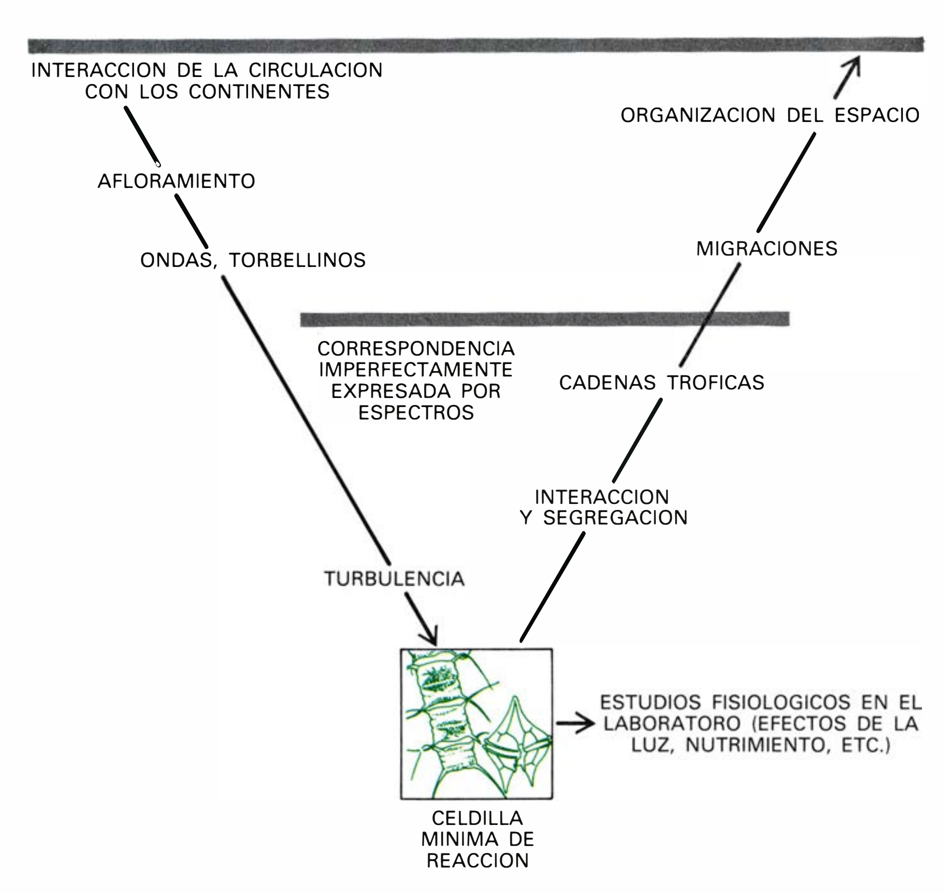
El primer componente está muy relacionado con la densidad total de población; a él contribuyen, sobre todo, aquellas especies o grupos de especies que, cuando se presentan, lo hacen en grandes masas y que son, por supuesto,

importantes en la flora de las áreas más fértiles.

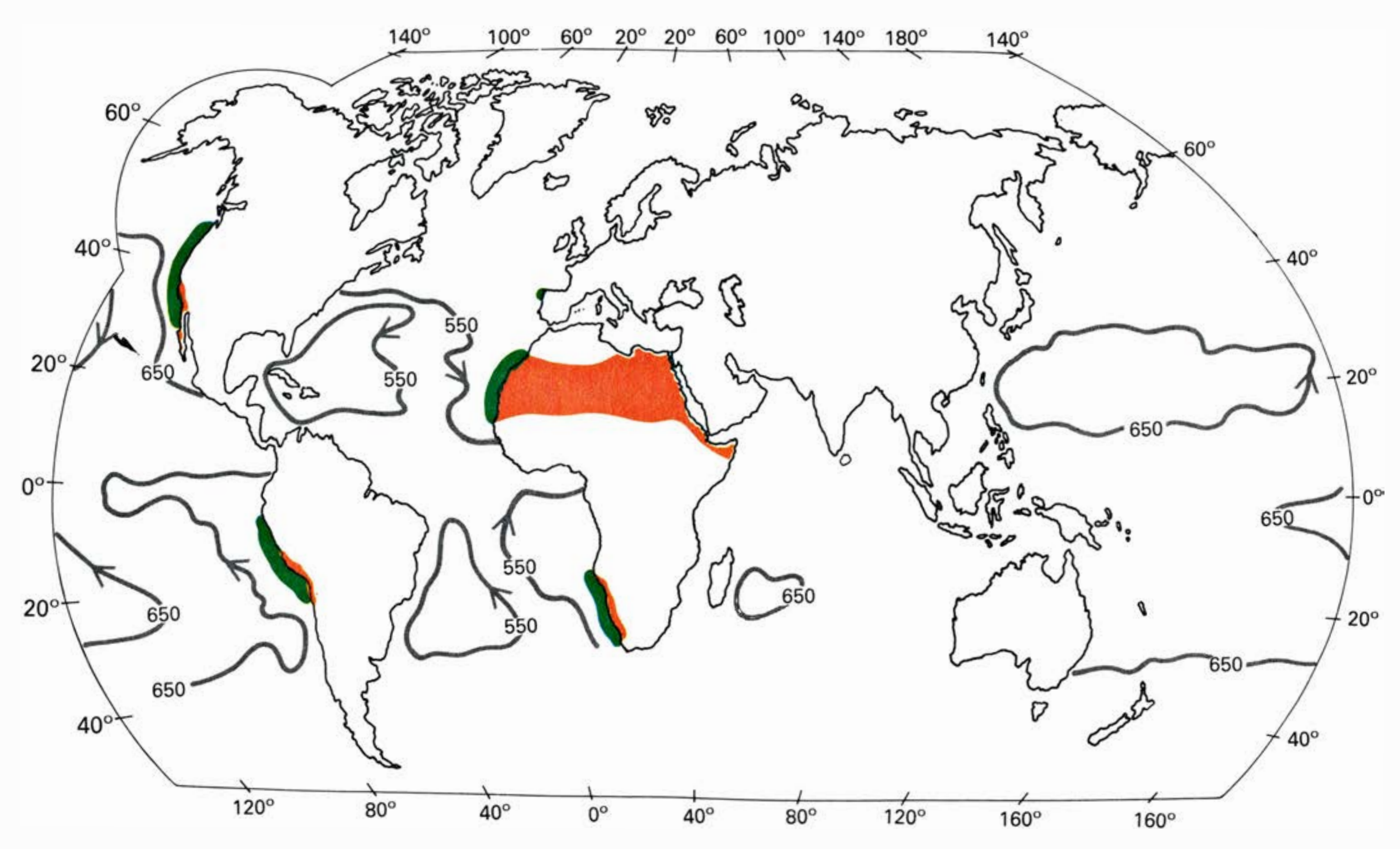
Los componentes segundo y tercero se prestan a comentarios que pueden tener mayor interés biológico. La ilustración de la página 17 muestra la posición que ocupa el extremo del vector que representa cada especie en un espacio definido por los tres primeros componentes. En este espacio estadístico, que resulta también ser un espacio ecológico, dos puntos cercanos, tales que sus correspondientes vectores formen ángulos parecidos con los ejes de coordenadas, representan especies cuya distribución es parecida. Especies muy separadas unas de otras, cuyos vectores forman ángulos muy distintos con los ejes, corresponden a regímenes de vida diferentes y distribuciones no coincidentes. De esta manera, en la distribución estadística debemos encontrar un reflejo de sus afinidades o diferencias en ecología.

Hemos dicho que el primer componente se relacionaba principalmente con la abundancia. A la derecha de la ilustración de la página 17 se ha representado, para mayor claridad, la proyección del extremo de los vectores correspondientes a cada especie en el plano definido por los componentes segundo y tercero. La dependencia ecológica se manifiesta en la agrupación que muestran especies de unos mismos grupos taxonómicos o de unos mismos tipos biológicos o género de vida. En una parte tenemos diatomeas, organismos sin flagelos, capaces de multiplicarse con suma rapidez; en otro lugar, las dinoflageladas, nadadoras y generalmente con más parsimonia en su multiplicación. En otra posición,





LA INTEGRACION de lo que ocurre en cada espacio limitado, en cada gota de agua, donde los organismos se relacionan con un pequeño volumen de agua y con otros organismos que comparten tal espacio, es lo que caracteriza el conjunto de la vida marina. Este mecanismo elemental puede ser estudiado experimentalmente en el laboratorio. Pero el destino de cada masa elemental de agua, cuando su localización y sus propiedades cambian, no está regulado por los organismos, sino por lo que puede denominarse clima oceánico, es decir, la combinación de cambios de calor y movimientos del agua, en general. La correspondencia entre los distintos climas oceánicos y la estructura de los ecosistemas pasa por una cadena de relaciones de causas y efectos que tiene dos segmentos, con la celdilla mínima de reacción como punto central. En las áreas de afloramiento predomina el efecto de la energía ambiental sobre las formas de organización ecológica a que conduciría la interacción de unos seres sobre otros.



AREAS MARINAS MAS FERTILES. Las cuatro principales áreas de afloramiento (*verde intenso*) corresponden a Oregón, California, Perú, Sahara y Namibia, se hallan en el borde oriental de los grandes torbellinos de circulación que caracterizan a cada hemisferio dentro de los océanos principales. Las líneas marcadas 550, 650, representan la topografía dinámica en centímetros de la superficie de cero sobre la de 1500 decibar, según Byrkov y Neuman. La topografía dinámica representa la altura relativa de la superficie del mar y sirve para caracterizar las corrientes de gradiente, un poco como en los mapas del tiempo. Junto a las áreas de afloramiento se extienden desiertos; se han señalado en rojo las zonas donde la pluviosidad no alcanza los 250 mm.

aproximadamente intermedia entre las anteriores, se reúnen las cocolitoforales, interesantes organismos muy pequeños, caracterizados por las piezas calizas que recubren sus células.

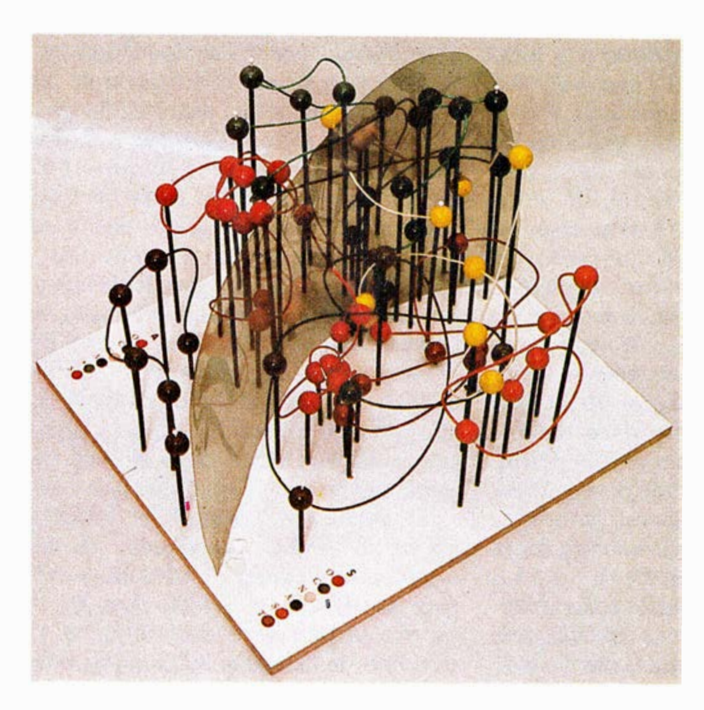
La proyección de los diferentes organismos sobre el plano definido por los componentes 2 y 3 es casi una réplica de su distribución en función de los factores ecológicos que se consideran especialmente importantes en su biología. La observación de cómo se suceden las poblaciones de fitoplancton cuando el agua que las contiene disminuye su turbulencia por disipación progresiva de la energía externa, a la vez que el nutrimento se agota, conduce a postular, como un acontecimiento muy general, la paulatina sustitución de comunidades en las que dominan las diatomeas por otras en las que las dinoflageladas adquieren importancia creciente. Tal observación, muy repetida, se explica por medio de un modelo cuantitativo sencillo en el que entran, como variables esenciales, la concentración de los elementos nutritivos decisivos (fósforo, nitrógeno) y el coeficiente de difusión turbulenta vertical, que es simplemente una expresión de la intensidad de agitación del agua. Sería demasiado prolijo exponerlo con detalle, pero reducido a lo esencial, una conclusión señala que en agua turbulenta se pierde una gran cantidad de células por difusión y hay un aporte importante de nutrimento. En estas condiciones, pueden mantenerse especies capaces de sacar provecho del nutrimento, es decir, que se puedan multiplicar rápidamente; la natación no es útil en tal situación, y la sedimentación tampoco es inconveniente serio. Por el contrario, en aguas estratificadas, cuyas capas superpuestas conservan su posición, a la larga sólo perduran organismos que pueden regular su nivel por natación, capaces de utilizar óptimamente las bajas concentraciones de nutrimento en el medio, lo cual los lleva a una tasa de multiplicación relativamente baja. En estas condiciones, estas poblaciones se benefician de cualquier limitación de las pérdidas; por ejemplo, puede ser positivo para la persistencia y evolución de estas especies el que sean poco consumidas por animales, lo que las lleve a desarrollar dispositivos antidepredadores.

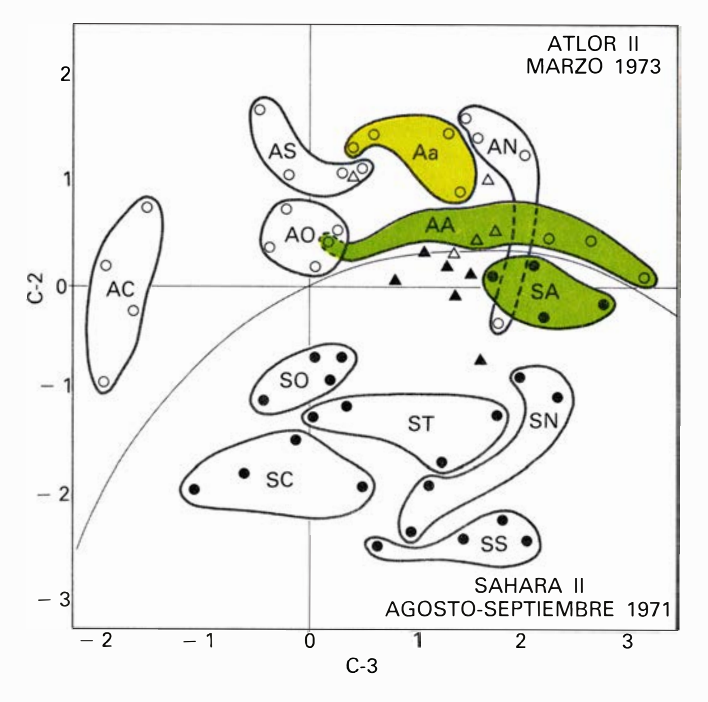
Cuando procedemos a situar las distintas áreas y los distintos niveles dentro de un mismo espacio de referencia, determinado por los componentes hallados a partir de la distribución de las especies, se halla una distribución muy lógica. El modelo plástico de esta distribución, tal como se representa en la ilustración de la página 16 viene a ser una especie de taquigrafía ecológica que representa, en un pequeño espacio, una cantidad muy grande de información. Con este modelo a la vista se podrían comentar durante un par de horas muchos fenómenos relativos a la distribución de organismos en áreas de afloramiento y zonas próximas y mencionar muchos hechos de la biología de estos organismos. Esta distribución resultó interesante porque el modelo inicial se basó en el estudio de los organismos en áreas de afloramiento y áreas periféricas, lo que permitió destacar el contraste entre unas y otras. Si el conjunto de muestras hubiera procedido exclusivamente de áreas con un afloramiento intenso, quizá hubiéramos podido poner de manifiesto contrastes entre las modalidades del fenómeno, pero no características del afloramiento en sí. Las muestras obtenidas en dos campañas de estudio sucesivas aparecen segregadas, excepto en las áreas de afloramiento más inten-

so, que siempre tienen caracteres comunes, reflejados también, como puede suponerse, por valores altos relativos al primer componente (abundancia). Las regiones *N* son ricas en fitoplancton y quedan próximas a las de afloramiento. Las áreas más cálidas (*T*) y de alta mar (*O*) son más pobres en fitoplancton y muestran, como se puede suponer, una mayor proporción de dinoflageladas. En la región meridional (*S*) las diferencias entre primavera y otoño son máximas, lo que ya sabíamos por el resultado de nuestros análisis del plancton. Las áreas con criptomonadales abundantes (*C*) son peculiares, con intensos gradientes verticales. Como es natural, las diferencias son máximas en superficie, que es donde ocurre la acción y donde la producción es mayor, mientras que hacia los 100 metros de profundidad las diferencias entre unas y otras áreas son menos importantes.

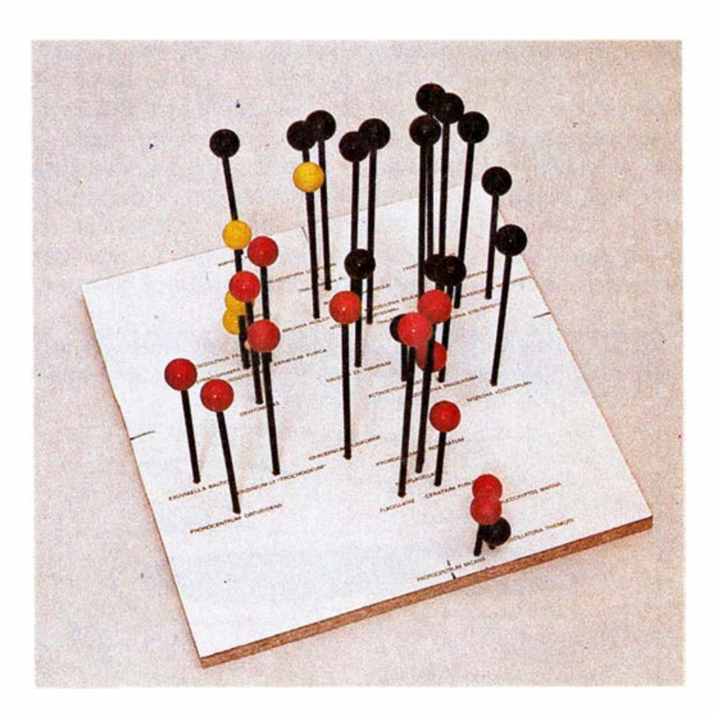
Otra conclusión de interés, que armoniza perfectamente con la indicada antes, es que las áreas de afloramiento se caracterizan por comunidades seleccionadas bajo una constelación de condiciones ambientales, entre las que las más importantes son la turbulencia elevada y el aporte de nutrimento que va con ella, y que dichas comunidades están formadas por una elevada participación de diatomeas, tal como podía esperarse de la teoría. Sin embargo, no todas las explicaciones son tan simples: en todo el plancton marino se encuentra multitud de pequeños organismos flagelados, pertenecientes a diversos grupos difíciles de clasificar. Su presencia puede explicarse de muchas maneras, lo que, hasta cierto punto, es como no explicar nada: podemos decir que estos organismos tienen una relación entre superficie y volumen muy alta y que esta característica proporciona una alta tasa de multiplicación bajo condiciones de abundancia de nutrimento. En realidad, los organismos más pequeños son los que más rápidamente se multiplican tras cualquier enriquecimiento; pero igualmente se puede recordar que, en condiciones de baja concentración de elementos nutritivos, una alta superficie relativa de las células es condición de supervivencia porque proporciona una mayor superficie relativa para la absorción. Quizá podríamos salir de esta situación ambigua recordando que, aunque los organismos pequeños son los típicos oportunistas, la vida ha evolucionado combinando el espacio y el tiempo gracias a organismos grandes y que viven más tiempo, con lo que no son afectados tan directamente por variaciones espaciales o temporales muy pequeñas. Las diatomeas grandes pueden almacenar ciertas reservas, perdurar en condiciones de poca luz o poco nutrimento y seguir multiplicándose más tarde. La oposición evolutiva organismos pequeños-organismos grandes está muy presente en el problema de la ocupación del espacio marino; no hay duda de que algunas de las respuestas o explicaciones de lo que ocurre se han de buscar en el terreno donde la ecología encuentra la física, y concretamente la termodinámica. Es decir, habrá que considerar los intercambios energéticos entre el medio y las diversas poblaciones de organismos.

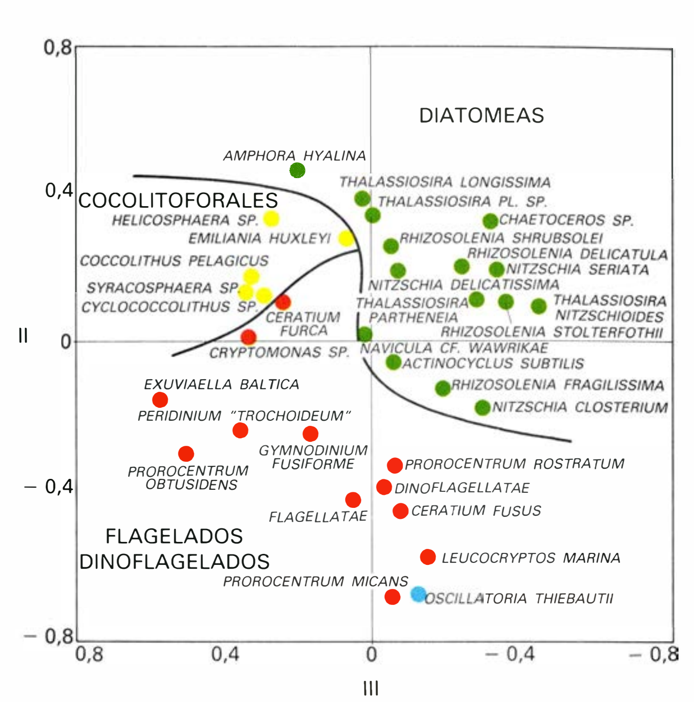
Las regularidades que hemos comentado explican otras características de los sistemas de afloramiento. Sabemos que las diatomeas forman una parte muy importante de sus productores primarios. Pero las diatomeas son organismos sin flagelos, que se sedimentan en el agua a velocidades variables, generalmente entre 10 y 40 centímetros por hora. Esta velocidad es muy superior a la de afloramiento y, aunque





ORDENACION DE LAS MUESTRAS (representadas por bolas de colores) en el espacio de los tres primeros componentes (*izquierda*). Las coordenadas de cada bola vienen dadas por el valor de cada componente para la muestra correspondiente. Se han separado con una lámina verde transparente las muestras de las diferentes campañas. Arriba y a la izquierda quedan las muestras de la campaña Atlor II, llevada a cabo en marzo de 1973; abajo y a la derecha las de la campaña Sahara II, realizada en agosto-septiembre de 1971. Los colores indican el área geográfica de procedencia de la muestra (señalada por letras en la figura de la derecha); el color verde corresponde a las zonas de afloramiento más intenso. Las bolas correspondientes a las sucesivas profundidades de cada muestra se han unido con un alambre de color. En cada caso, la muestra de superficie se ha señalado con un palito blanco. A la derecha se muestra una proyección del modelo de la izquierda en el plano de los componentes segundo y tercero. Sólo se han representado los puntos correspondientes a las muestras de 0, 10, 20 y 30 metros de Sahara II (*círculos negros*) y de Atlor II (*círculos blancos*) y los correspondientes a las muestras de 100 metros de Sahara II (*triángulos negros*) y de Atlor II (*triángulos blancos*). Los puntos correspondientes a cada una de las áreas se han reunido dentro de una línea continua. Dentro de cada grupo, la primera letra mayúscula indica la campaña (*S:* Sahara II, *A:* Atlor II) y la segunda el área. *A* y *a* corresponden a las zonas de afloramiento intenso. Las diferencias son mayores en las muestras de superficie que en las de 100 metros.





MODELO DE LA POSICION (indicada en esta ilustración por bolas de colores) del extremo del vector que representa cada especie en el espacio de los tres primeros componentes principales (*izquierda*). Las coordenadas de cada bola vienen dadas por el coeficiente de correlación de la especie con el eje correspondiente (*véanse las escalas en la figura de la derecha*); el eje vertical se refiere al primer componente; los ejes horizontales, al segundo y tercero. Los colores distinguen los grupos taxonómicos más importantes. El verde corresponde a las diatomeas, el rojo a las dinoflageladas, el anaranjado a los flagelados y el amarillo a las cocolitoforales. A la derecha se muestra una proyección del modelo de la izquierda en el plano de los dos componentes principales segundo y tercero. Como en el modelo de la izquierda, las coordenadas de cada punto vienen dadas en esta figura por la correlación de la especie correspondiente con cada uno de los ejes. Se han separado por medio de una línea discontinua los principales grupos taxonómicos.

los remolinos perturban las trayectorias, no anulan la componente de movimiento hacia abajo. Por esta razón, en las áreas de afloramiento en que la producción de plancton es muy grande, el transporte total de materia orgánica hacia abajo es relativamente mucho mayor que en las áreas marinas de menor fertilidad. Tal movimiento se ha estimado más o menos directamente a través de una serie de investigaciones que, aunque aparentemente centradas en otros temas, convergen, en realidad, sobre aspectos esenciales del fenómeno de afloramiento.

El flujo de partículas descendentes, a nivel de algún límite arbitrario que separe la parte superior de los océanos o "troposfera" marina, de las capas profundas, suele ser del 5 al 10 por ciento de la producción en mares pobres. Este material alimenta la fauna y las bacterias de aguas profundas y sólo una pequeña parte llega al fondo. En las áreas de afloramiento, entre el 30 y el 40 por ciento de la materia orgánica producida cruza hacia abajo la frontera mencionada; en las aguas profundas, esta cantidad tan elevada no se utiliza totalmente, de manera que siempre queda un pequeño remanente, una fracción de la producción primaria, que se incorpora al sedimento en forma de materia orgánica. El sedimento debajo de las áreas de afloramiento es obscuro, rico en materia orgánica y también en fosfato. Muchos yacimientos de fosfatos, como los del Sahara, consisten simplemente en sedimentos depositados debajo de antiguas áreas de afloramiento.

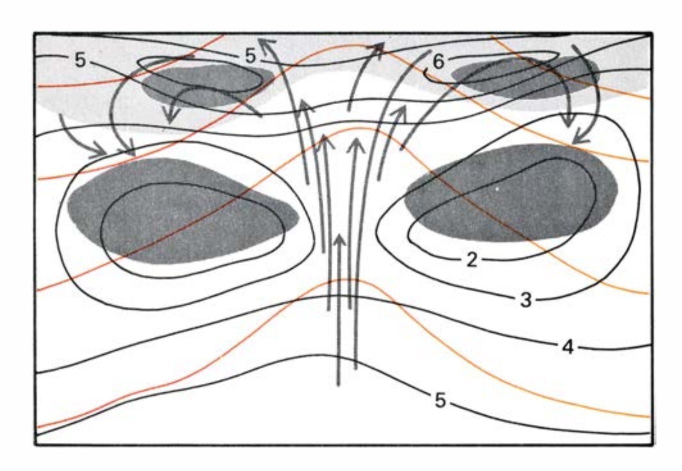
Como es natural, estas diferencias entre ecosistemas ricos y pobres se manifiestan también no sólo en la materia particulada que va del compartimento superior al inferior, sino también en la fracción de materia reciclada, o sea, oxidada o mineralizada, dentro de cada compartimento. Es posible que en esto intervenga también la organización general de las cadenas alimentarias, en el sentido de que los sistemas esencialmente fluctuantes, como son los de afloramiento, no permitan un gran desarrollo de carnívoros superiores que contribuyan al aprovechamiento de la materia orgánica producida. Se sabe, por ejemplo, que en el Perú, tras la reducción en la población de anchoveta que ocurrió a partir del año 1972, la contribución de materia orgánica al fondo resultó muy incrementada.

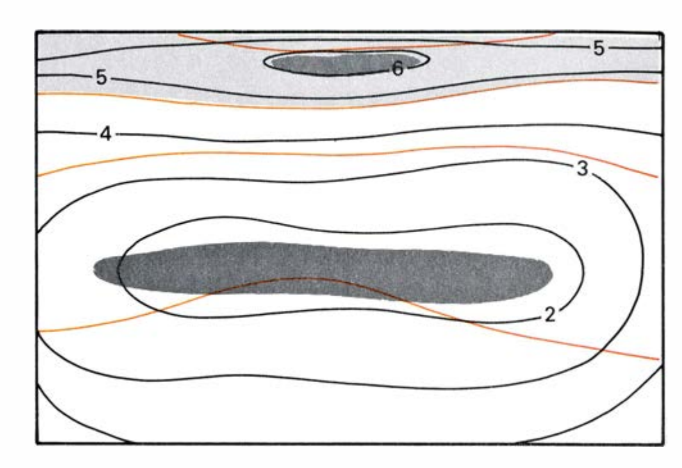
En este punto, la consideración de los sistemas de afloramiento nos lleva a establecer comparaciones con los lagos eutróficos y a tratar de encontrar una caracterización o descripción común a ambos tipos de ecosistemas. Al fin y al cabo, es misión de la ciencia proporcionar descripciones abreviadas. En este sentido, la ciencia ecológica ha de permitirnos captar lo esencial de diversos fenómenos que, por este hecho, se agrupan en una misma clase, plantean problemas equivalentes y admiten, y aquí está lo interesante desde el punto de vista práctico, previsiones o soluciones comunes.

Las áreas de afloramiento y los lagos eutróficos son los sistemas acuáticos más productivos. Incluso se parecen por los valores absolutos de su producción primaria. Ambas clases de ecosistemas están alimentados, de manera forzada, por elementos químicos que proceden, respectivamente, de capas marinas profundas, o de los afluentes y de los ecosistemas terrestres vecinos. Todas las reacciones dependientes de las concentraciones de los componentes del sistema se aceleran, con cierta desviación en cocientes como los que se pueden establecer entre fitoplancton y nutrimento o entre zooplancton y fitoplancton. Si estos cocientes se consideran como eficiencias, se puede decir que la eficiencia disminuye y que las cadenas alimentarias se acortan. Estos cambios se pueden considerar en relación a un ecosistema más normal o más cerca del equilibrio, si tal situación existe. El ecosistema forzado, en este caso el área de afloramiento o el lago eutrófico, reacciona como si se opusiera al flujo incrementado de nutrimento, no sólo por la ya mencionada

aceleración de las reacciones, sino también por una respuesta que creemos es la más característica de toda esta clase de sistemas forzados o sometidos a tensión: la expulsión o la derivación de una fracción de los elementos del sistema a través de circuitos externos al ecosistema de referencia. El oxígeno y el nitrógeno circulan por la atmósfera, el carbono y el fósforo por el sedimento.

Los mecanismos son sencillos y fáciles de entender. Los ecosistemas acuáticos de alta fertilidad se sobresaturan de oxígeno en las capas superficiales por la función fotosintética. Parte del oxígeno escapa a la atmósfera; a la vez, la persistencia de la situación de sobresaturación impide el retorno de este oxígeno, de manera que la superficie del agua funciona como una válvula de oxígeno que permite su salida hacia la atmósfera, pero no su entrada. Este oxígeno perdido no estará disponible más tarde para oxidar toda la materia orgánica producida, por lo que una parte de ésta deberá incorporarse como



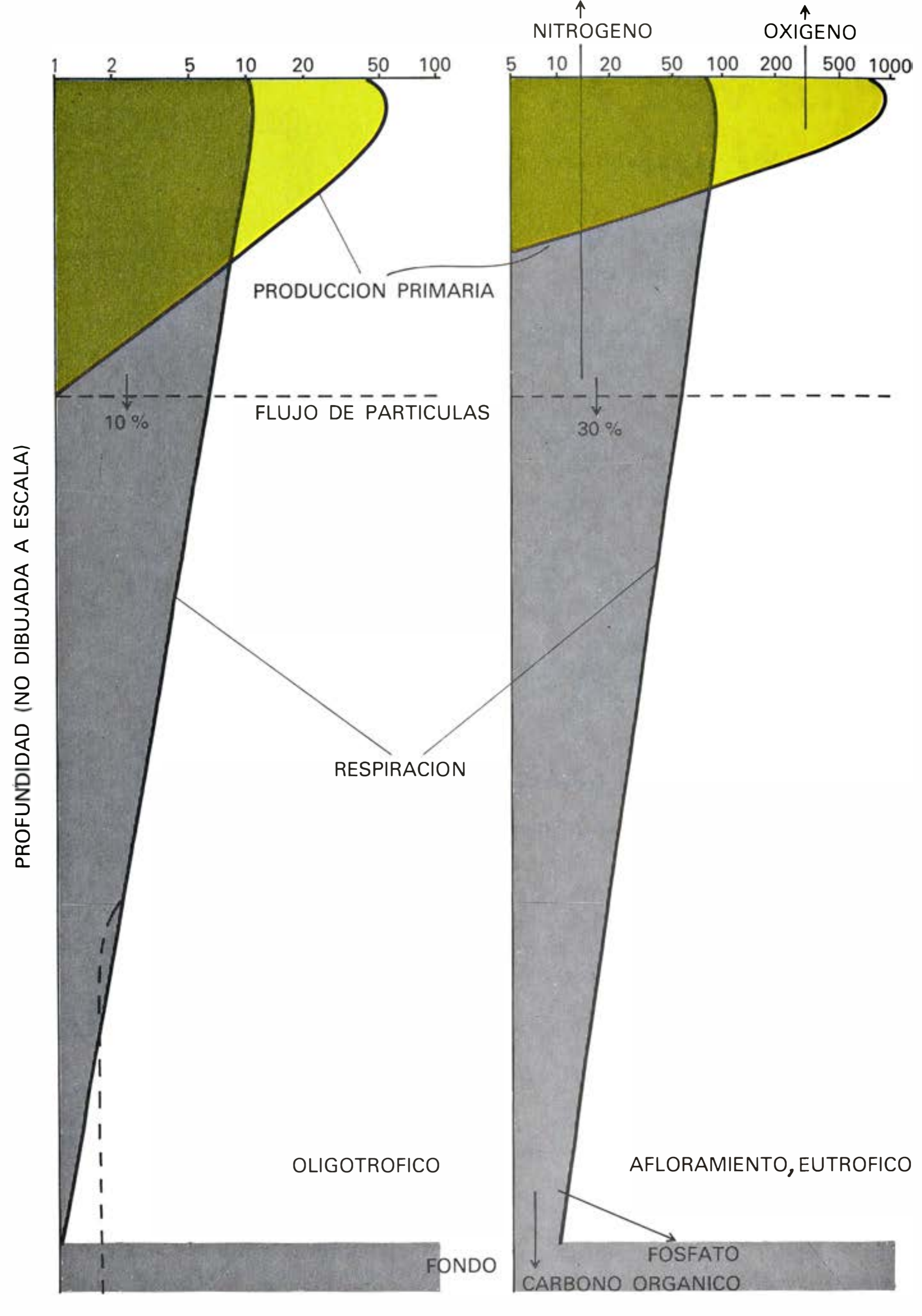


LOS FENOMENOS DE AFLORAMIENTO no consisten, por supuesto, en un flujo laminar ascendente. El agua diverge en superficie; por debajo de la superficie se establecen células de circulación de grandes dimensiones, que permiten el retorno de parte del agua y la mezcla y resiembra continua de las poblaciones. En el centro de células de circulación de menores dimensiones, comprendidas en las principales, los mismos elementos son reciclados repetidamente y, con frecuencia, aparecen núcleos o lentejas de agua con muy poco oxígeno, donde se pueden manifestar fenómenos biológicamente muy importantes, como desnitrificación (paso del nitrógeno de forma combinada a forma gaseosa) o la producción de ácido sulfhídrico. En la parte superior de esta figura se representa la formación idealizada de semejantes distribuciones (toros, *a la izquierda*, y lentejones, *a la derecha*) y, en la parte inferior, un ejemplo real del área de afloramiento del noroeste de Africa, observada a fines de verano de 1971, con las distribuciones de temperatura (*rojo*) y de oxígeno (*negro*) que muestran la superposición de estructuras como las indicadas arriba, vestigios de otros episodios o "eventos" de afloramiento.

tal al sedimento. Por otra parte, a profundidad y en condiciones de poca concentración de oxígeno, se produce desnitrificación y aparece nitrógeno gaseoso que está en continuidad con el de la atmósfera y se difunde hacia ella. Finalmente, no sólo precipita fósforo con la materia orgánica, sino que también puede precipitar al alcalinizarse el agua, en forma de fosfato cálcico; de una u otra forma, el sedimento, tanto de lagos eutróficos –donde otros mecanismos son posibles, con el mismo efecto– como de áreas de afloramiento, es rico en fósforo. Estos circuitos externos funcionan como amortiguadores que frenan la actividad del ecosistema. En realidad, se pueden diseñar muchos modelos hidráulicos [*véase la ilustración de la página siguiente*] de ecosistemas para ilustrar estos principios, que son absolutamente generales. Es importante considerar que si cesa la situación de tensión que mantenía alta la fertilidad, puede haber un retorno de los materiales almacenados fuera de los límites del ecosistema de referencia. Este conocimiento tiene interés práctico. Los lagos que han permanecido mucho tiempo forzados en su producción, en situación eutrófica, han acumulado mucho fósforo en el sedimento. Si se intenta promover su retorno hacia una situación más "normal" cortando el exceso de ingresos de nutrimento, el éxito no puede ser inmediato, pues se invierten tanto la circulación del fósforo, que retorna del sedimento al agua, como del nitrógeno, que retorna de la atmósfera por la acción de los fijadores de nitrógeno.

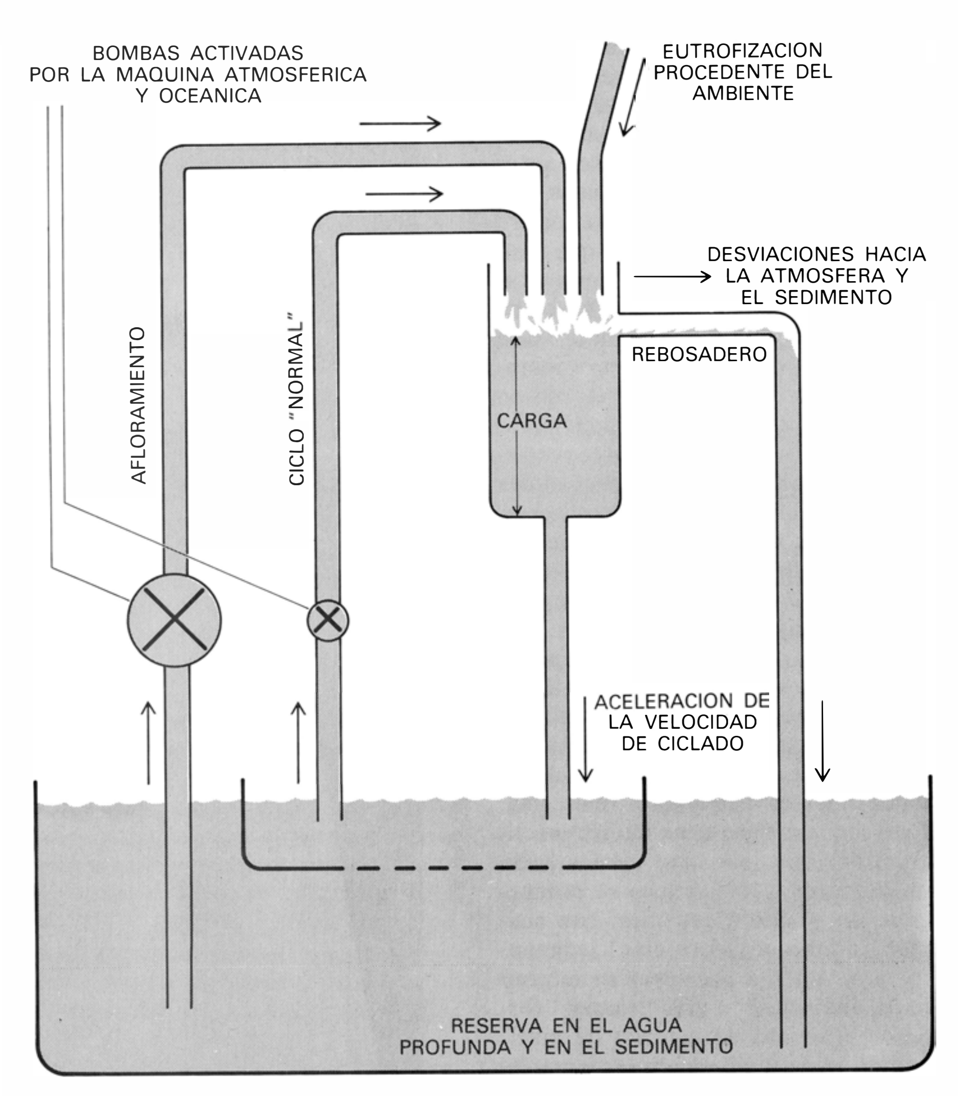
Este principio es tan absolutamente general que vale también para los sistemas terrestres. La agricultura fuerza la tierra y pone en marcha circuitos o derivaciones externas análogas a las existentes en los ecosistemas acuáticos. Una gran parte de los abonos nitrogenados se desnitrifican, y su nitrógeno va a la atmósfera. En cuanto al fósforo, queda en parte eliminado de la circulación en forma de fosfatos muy insolubles que, precisamente, son característicos de suelos que han experimentado por mucho tiempo la influencia humana.

Esta generalización resulta especialmente atractiva por cuanto nos permite considerar toda la historia de la biosfera como una manifestación del mismo proceso. Sabemos que las características de nuestro planeta, incluida nuestra atmósfera, están estrechamente relacionadas con el desarrollo de la vida. La antigua biosfera llevó una gran cantidad de oxígeno y de nitrógeno gaseoso a la atmósfera y condujo a la acumulación de ingentes cantidades de carbono reducido, en forma de hulla y petróleo. El mecanismo pudo ser el mismo que opera en las áreas de afloramiento y en los lagos eutróficos, que son característicos sistemas forzados en la biosfera actual. Un análisis más detallado nos lleva a aceptar que la separación de elementos hacia compartimentos contiguos, en los límites de un determinado ecosistema de referencia, no depende solamente de la producción primaria, que es, a su vez, función de un aporte de nutrientes lateral o vertical, sino también del gradiente vertical de la estructura funcional de los ecosistemas.



ESTRUCTURA VERTICAL EN LA ORGANIZACION DE LOS ECOSISTEMAS acuáticos. Dicha estructura puede describirse, de manera muy simplificada, por la falta de superposición de la asimilación y de la respiración. En las capas superiores, iluminadas, la asimilación predomina; en las capas profundas, sin luz, se manifiesta una respiración neta. Esta situación comporta un transporte de materia orgánica de arriba abajo. Si tomamos algún nivel de referencia para estimar tal sedimentación de materia orgánica, un sistema de afloramiento –lo mismo que un lago eutrófico, a la derecha– se caracteriza no solamente por una mayor producción, sino también porque una fracción relativamente más alta de la misma se transfiere hacia aguas más profundas, donde es oxidada, a veces incompletamente. La velocidad de transporte de materia se hace máxima allí donde se cruzan las dos líneas de cada gráfico.

El mecanismo fundamental de la ecología del plancton consiste en la producción primaria en la región iluminada, que se puede describir tam-



LA COMPARACION CON ARTEFACTOS HIDRAULICOS Y ELECTRICOS esclarece a menudo detalles del funcionamiento de los ecosistemas. Con fines didácticos se presenta aquí un sistema hidráulico que puede servir de base para debatir algunos problemas de las áreas de afloramiento. En régimen normal (áreas marinas en general), una pequeña bomba (olas, corrientes marinas) recicla los elementos nutritivos, es decir, mezcla el agua y propaga la mezcla o turbulencia hacia abajo, de manera que continuamente parte del agua rica se mezcla con la de la zona iluminada. El afloramiento ha de concebirse como una intensificación de este proceso y sus principales consecuencias son dos: una aceleración del flujo, o del reciclado de los elementos, causado por la mayor altura de carga en el modelo, y una desviación del exceso de material en el ciclo por otras vías. En los sistemas de afloramiento, estas derivaciones externas están constituidas por la atmósfera, para el oxígeno y el nitrógeno, y por el sedimento, en relación con el fósforo y el carbono orgánico. (Pueden diseñarse otros modelos hidráulicos.)

bién como un transporte de electrones, forzado por la energía de la luz. El interior de los organismos adquiere propiedades reductoras, el medio queda más oxidado. La gravedad lleva a los organismos hacia abajo, de manera que mecánicamente se transfiere poder reductor hacia las capas profundas. De aquí se origina un gradiente vertical en el potencial de oxidación-reducción en el medio. Los mecanismos químicos, físicos y bioquímicos de separación de materiales en el límite de los ecosistemas dependen estrechamente de los gradientes locales de dicho potencial. En general, gradientes más intensos, separan más elementos en el límite de los ecosistemas. Por esta razón, la acumulación de materia orgánica y de fosforitas en los sedimentos no es un indicador sencillo de la producción primaria de las épocas pasadas, sino de dicha producción combinada con el grado de estratificación del agua. Para un determinado nivel de producción, agua hecha muy estable, por ejemplo, por un clima uniforme y cálido o por sobreposición de agua desalada procedente de la fusión de glaciares, ha de separar más materiales en sus límites. Por otra parte, una mezcla muy intensa –que requiere la correspondiente energía– puede mantener una productividad elevada, sin una eliminación tan importante de materiales hacia la atmósfera y hacia el sedimento. Consideraciones de este tipo han de tenerse en cuenta especialmente al tratar de reconstruir ecosistemas de afloramiento del pasado.

La superficie de Venus

Oculta por nubes, se ha cartografiado ahora por radar desde la Tierra y desde un vehículo espacial en órbita alrededor de Venus. Las imágenes sugieren una constitución geológica intermedia entre la de la Tierra y la de Marte

Gordon H. Pettengill, Donald B. Campbell y Harold Masursky

A lo largo de los últimos 15 años, la superficie de Venus, perpetuamente oculta por su espesa capa de nubes, se ha explorado activamente mediante señales de radar lanzadas desde la Tierra; y en el curso del último año y medio se ha explorado también mediante señales procedentes de un vehículo espacial colocado en órbita alrededor de ese planeta. Las señales de radar reflejadas revelan que la superficie del planeta está marcada por accidentes geológicos que sugieren formación de cráteres de impacto, vulcanismo y actividad tectónica. A causa del sincronismo entre el movimiento orbital y el rotacional, así como de otras limitaciones, la vista de Venus desde la Tierra por radar queda de hecho reducida a menos de un hemisferio completo del planeta. Por otra parte, el vehículo en órbita alrededor de Venus ha cubierto la circunferencia completa del planeta entre 74 grados de latitud norte y 63 grados de latitud sur. Dentro de esa ancha banda, que comprende el 93 por ciento de la superficie del planeta, el vehículo en órbita puede medir alturas con un error inferior a 200 metros. El vehículo espacial ha encontrado que Venus es notablemente llano: el 60 por ciento de su superficie cae dentro de un intervalo de alturas de sólo un kilómetro. Un accidente, sin embargo, se eleva a 11 kilómetros por encima de la llanura circundante, y por tanto es más alto que el Monte Everest. Denominado Maxwell, se trata probablemente del cono de un volcán.

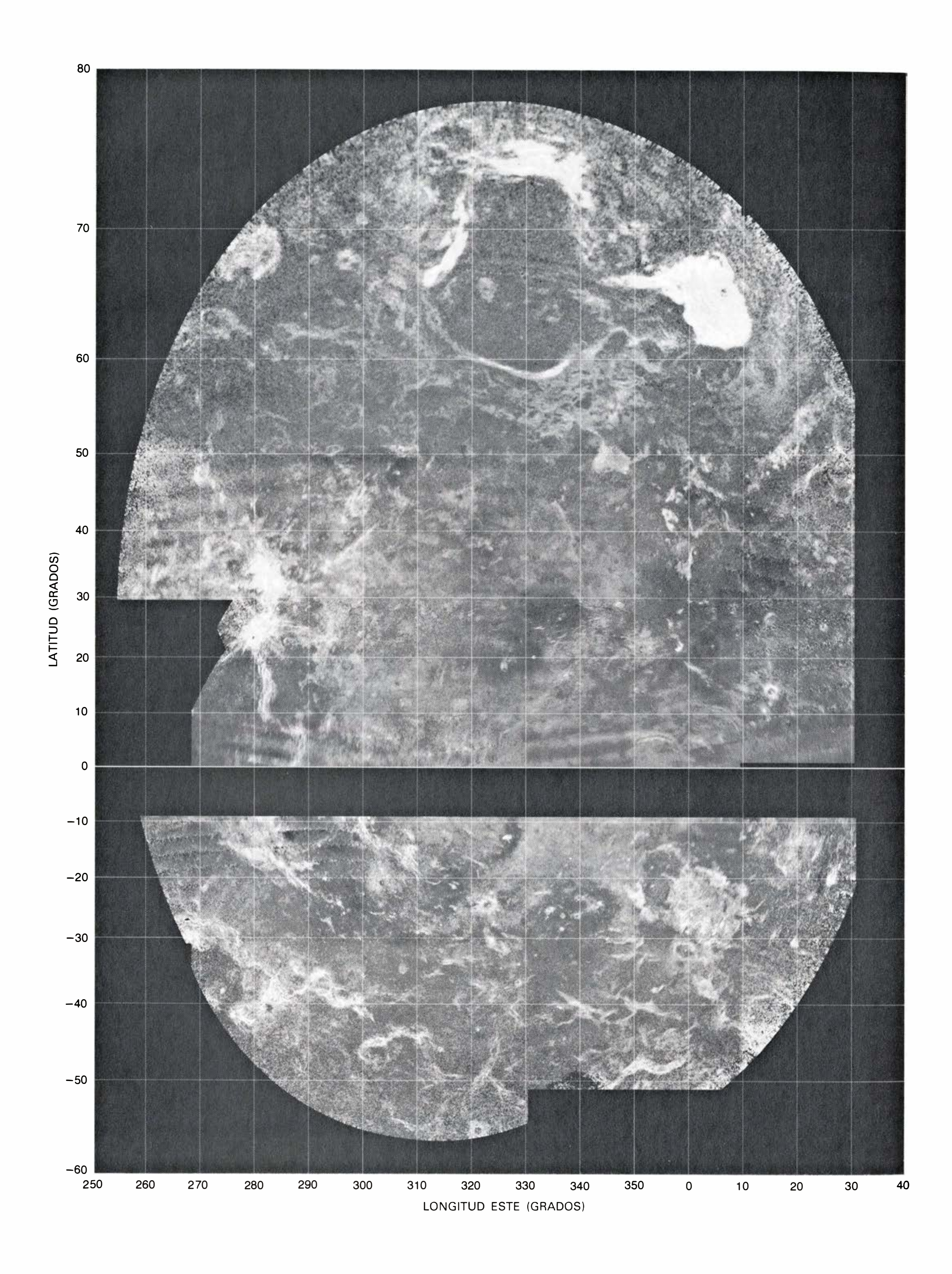
Cuando los primitivos telescopios pusieron de manifiesto que Venus no solamente era brillante, sino que al parecer estaba recubierto de nubes, la imaginación humana se apresuró a poblar la superficie del planeta con criaturas dinosauriformes que vivían en pantanos humeantes. La distancia del planeta al Sol es solamente un 72 por ciento de la distancia de la Tierra al Sol, así que era de esperar que fuese substancialmente más cálido que la Tierra y que las nubes fuesen vapor de agua condensado. Después, cuando los espectrógrafos y otros instrumentos mostraron que la atmósfera de Venus estaba formada principalmente por dióxido de carbono y se hallaba casi completamente desprovista de vapor de agua, la mayoría de las primitivas fantasías se desvanecieron. Una de ellas, sin embargo, se confirmó. Las medidas de la radiación térmica del planeta, realizada a longitudes de onda de radio suficientemente grandes para penetrar las nubes, han mostrado que la superficie es realmente caliente: 475 grados Celsius.

Hacia 1960 se habían construido sistemas de radar con potencia suficiente para detectar en la Tierra ecos de radio procedentes de Venus. Funcionando a longitudes de onda entre 12 y 70 centímetros, los sistemas de radar penetraron la atmósfera del planeta y demostraron la existencia de una verdadera superficie. Aunque los primitivos sistemas carecían de la resolución necesaria para determinar el radio de la superficie sólida con alguna precisión, suministraron las primeras indicaciones acerca de dos propiedades generales de la superficie: su reflectividad media y su "aspereza" media para las longitudes de onda del radar. La reflectividad observada de aproximadamente 15 por ciento era típica de muchas rocas terrestres.

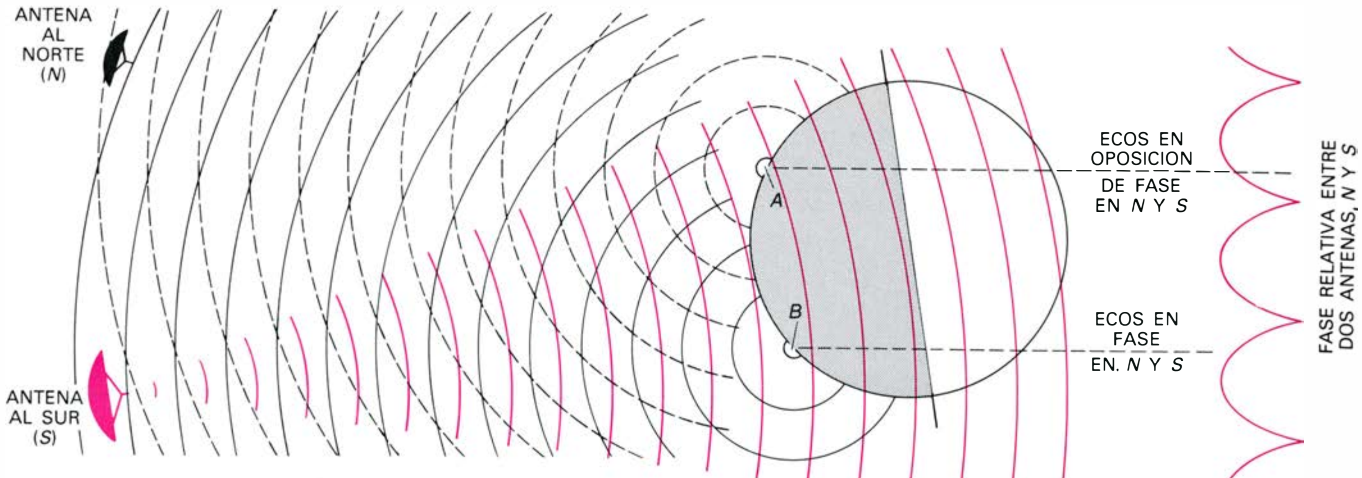
Al trabajar con observaciones de radar hechas en 1961, William B. Smith, del Laboratorio Lincoln del Instituto de Tecnología de Massachusetts, buscó indicaciones del ensanchamiento de frecuencias en los ecos devueltos. Si Venus está en rotación, las componentes de la señal de radar que son reflejadas por diferentes áreas de la superficie deben haber sufrido corrimientos Doppler distintos. Aquellas componentes de la señal que inciden sobre una porción de la superficie que se acerca aumentarán en frecuencia, mientras que aquellas que incidan sobre zonas que se están alejando decrecerán su frecuencia. El resultado de conjunto es ensanchar el espectro de frecuencia de los ecos. Smith llegó a la conclusión de que el ensanchamiento de frecuencia de los ecos era pequeño y que posiblemente disminuía cuando Venus pasaba entre la Tierra y el Sol.

En aquella época no se sabía prácticamente nada acerca de la velocidad de rotación de Venus. Basándose en sus observaciones, Smith sugirió que la rotación podría ser retrógrada: en sentido opuesto al movimiento del planeta en torno al Sol. Año y medio más tarde, en 1962, Roland L. Carpenter y

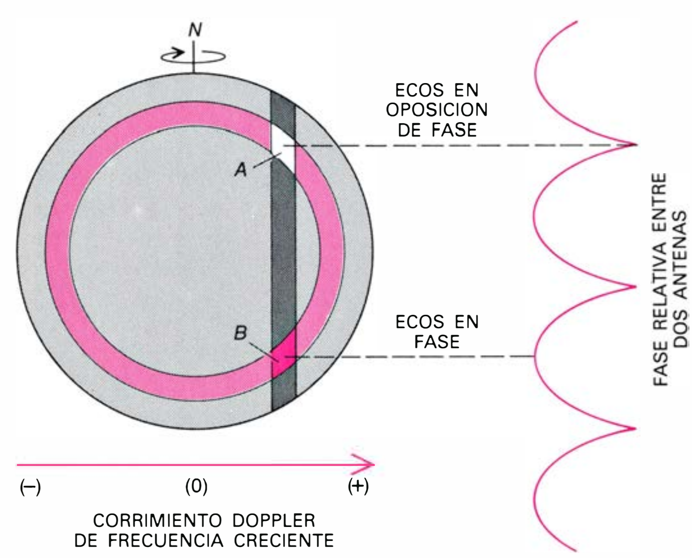
IMAGEN DE RADAR DE VENUS, ensamblada a partir de observaciones hechas en el Observatorio de Arecibo, Puerto Rico, en 1975 y 1977, cuando Venus pasó a su menor distancia de la Tierra. En tales épocas, Venus siempre presentaba casi la misma "cara" a la Tierra, de modo que sólo un poco menos de un hemisferio, la región centrada a 320 grados de longitud Este, se ha podido cartografiar con éxito. La banda vacía bajo el ecuador es una región en la que, en 1975 y 1977, el método de obtención de imágenes era incapaz de resolver los ecos de radar. Los ecos procedentes de esa región se resolvieron con éxito en observaciones hechas durante el paso próximo del pasado junio, pero los datos se están elaborando todavía. La geometría observada en 1975 hizo el hemisferio Norte del planeta ligeramente más accesible que el Sur, como se ve claramente en esta proyección de Mercator. El brillo de la imagen es proporcional al grado de aspereza de la superficie con dimensiones de unos cuantos centímetros, con excepción de las bajas latitudes, donde las pendientes en la escala de un metro también influyen en la señal reflejada. La resolución lateral en este mosaico varía entre 10 y 20 kilómetros. (Un grado de latitud de Venus es igual a 106 kilómetros.) La zona brillante en la parte superior derecha, llamada Maxwell en honor del célebre físico inglés (centrada a 65 grados de latitud Norte y 5 grados de longitud Este), y el área en la parte central izquierda, llamada Beta (25 grados Norte, 283 grados Este) casi han saturado la pantalla en esta representación. Las dos zonas se muestran a contraste reducido en las ilustraciones de la página 30.

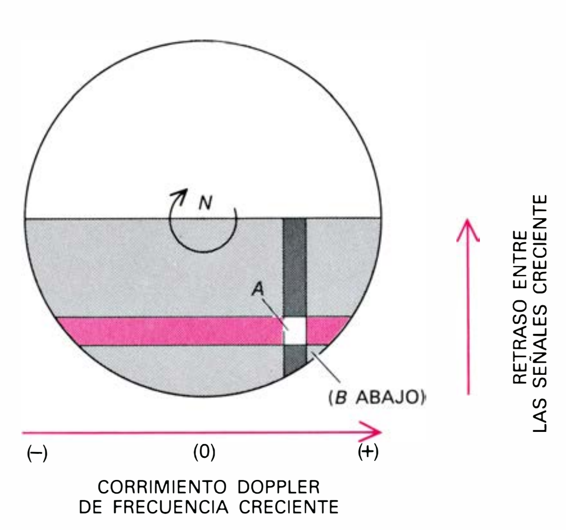


80
70
60
50
40
30
20
10
0
−10
−20
−30
−40
−50
−60
LATITUD (GRADOS)
250
260
270
280
290
300
310
320
330
340
350
0
10
20
30
40
LONGITUD ESTE (GRADOS)

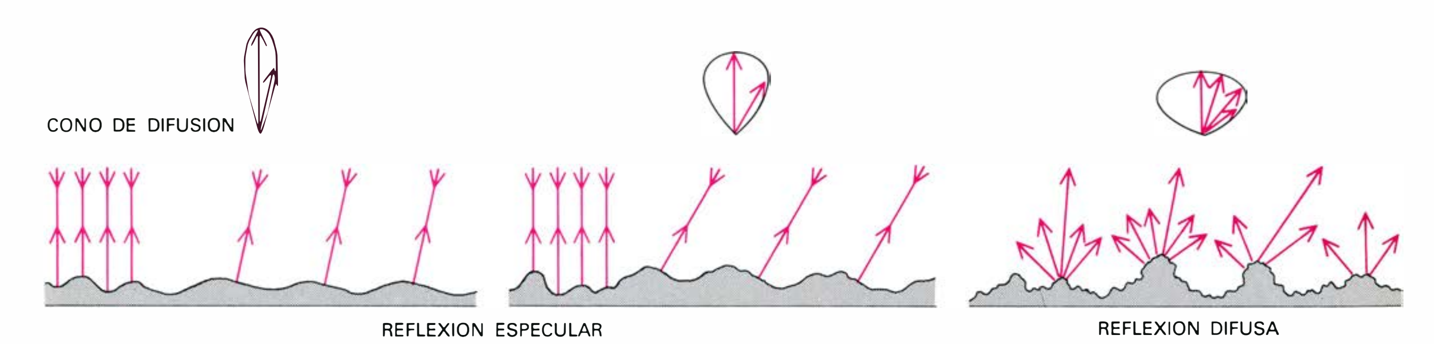


METODO DE CARTOGRAFIA DE VENUS por radar usado por los autores y sus colaboradores. En él se emplea la interferometría para distinguir entre ecos procedentes de dos regiones separadas en la superficie del planeta. En estos experimentos, el transmisor está en el radiotelescopio de 300 metros de Arecibo. La señal de radio emitida tiene una longitud de onda nominal de 12 centímetros y una potencia de 400 kilowatt. El haz emitido (*en color*) consta de una señal de onda continua de unos cinco minutos de duración cuya fase se ha hecho variar sistemáticamente. Cuando los ecos de radar retornan de Venus, después de un tiempo total de viaje de unos cinco minutos, el tiempo preciso de propagación se puede deducir localizando las configuraciones de fase que estaban incorporadas en la señal saliente. El eco se registra simultáneamente en la antena de 300 metros (*S*) y en una antena "pasiva" de 30 metros (*N*) situada 10 kilómetros hacia el norte. Un punto de Venus tal como el *B*, para el cual las distancias de ida y vuelta *SBS* y *SBN* difieren en un múltiplo exacto de la longitud de onda, da la misma fase recibida en las dos antenas. Otro punto *A*, para el cual los caminos *SAS* y *SAN* difieren en un múltiplo impar de la semilongitud de onda, da ecos que están en oposición de fase. Cuando los ecos recibidos en las dos antenas se combinan coherentemente con ajustes en sus fases relativas, es posible suprimir el eco de *A* o el de *B*. Aquí las señales del punto *A* se anulan, dejando visible sólo las de *B*.





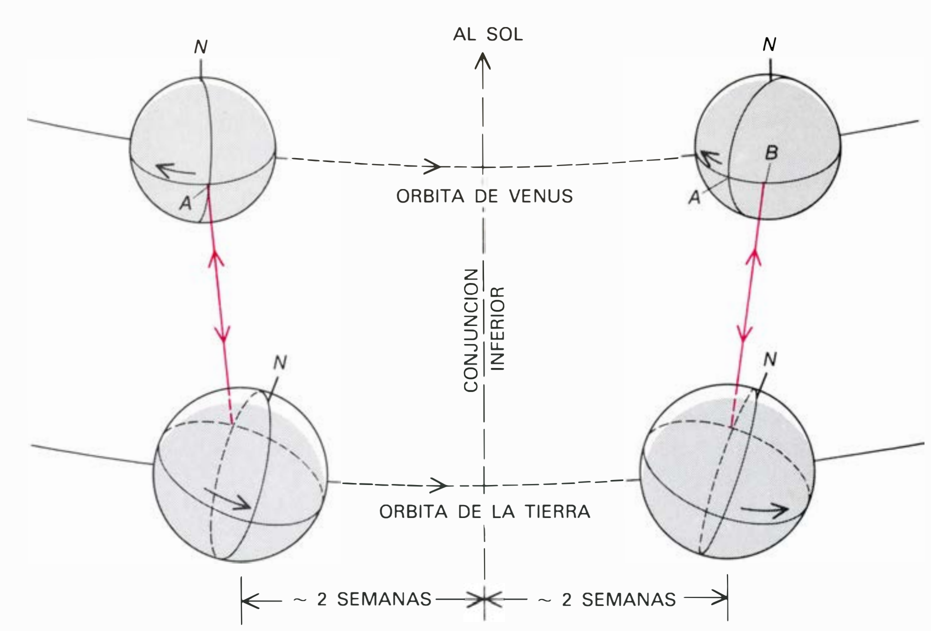
LA ROTACION DE VENUS da lugar a un corrimiento Doppler en las señales de retorno. Los ecos que proceden de lugares que se están acercando se corren hacia frecuencias ligeramente más altas; los que proceden de puntos que se están alejando se corren hacia frecuencias ligeramente más bajas. Dos puntos *A* y *B* producen ecos con el mismo tiempo de viaje y corrimiento Doppler. La intensidad de la difusión procedente de un par de puntos conjugados como el *A* y el *B* se establece analizando el eco de radar para extraer las componentes con el mismo tiempo de propagación y corrimiento Doppler.



PODEMOS DEDUCIR el carácter de una superficie a partir de la potencia difundida a varios ángulos. Una superficie ondulada pero lisa, a la escala de la longitud de onda de observación, sólo retrodifunde la señal de radar cuando la faceta está en ángulo recto con el observador. Para pendientes muy suaves, esto produce un estrecho cono de dispersión (*izquierda*). Cuando la superficie presenta facetas algo más abruptas, el cono es más ancho (*centro*). Una superficie rugosa a la escala de la longitud de onda produce reflexión difusa con una intensidad que depende del ángulo de observación (*derecha*).

Richard M. Goldstein, del Laboratorio de Propulsión a Chorro del Instituto de Tecnología de California, mostraron que la velocidad de rotación de Venus era muy pequeña, con un período de unos 240 días terrestres, y que la rotación era realmente retrógrada.

El siguiente avance importante en el estudio de Venus por radar llegó en cuanto se hubo instalado la antena de radar de Arecibo en Puerto Rico (con un diámetro de 300 metros y funcionando a una longitud de onda de 70 centímetros), la antena de seguimiento espacial lejano de Goldstone, California (con un diámetro de 24 metros y operando a 12,5 centímetros), y el sistema de radar Haystack en Massachusetts (con un diámetro de 43 metros y operando a 3,8 centímetros). Hacia 1966, la precisión de la medida de distancia de Venus con esos instrumentos había mejorado hasta un error inferior al kilómetro, es decir, una parte en 10^8 de la distancia al planeta. Se realizaron medidas con esta precisión durante varios años en Arecibo por Rolf B. Dyce y dos de nosotros (Campbell y Pettengill) y, en Haystack, por Richard P. Ingalls y uno de nosotros (Pettengill). En colaboración con Irvin I. Shapiro y otros investigadores del Instituto de Tecnología de Massachusetts, dedujimos que el radio medio de la superficie de Venus se aproximaba a 6050 kilómetros. A medida que las órbitas de la Tierra y Venus se conocieron con más exactitud por ajuste del movimiento de los dos planetas a largas series de datos de radar, resultó con el tiempo posible observar variaciones en el radio de Venus cuando la región reflectora se movía alrededor del ecuador del planeta.



OBSERVACION DE VENUS por radar con alta resolución. Se limita a un período de unas cuatro semanas centrado en el instante de la conjunción inferior, cuando Venus está alineado entre el Sol y la Tierra y, por tanto, a la mínima distancia de ésta. Se necesita una distancia mínima al objetivo porque la intensidad de la señal de radar decrece en razón inversa a la cuarta potencia de la distancia a dicho objetivo. La conjunción inferior se produce cada 19 meses. Como Venus da una revolución retrógrada (en sentido opuesto al movimiento del planeta en torno al Sol) cada 243 días terrestres, gira de este a oeste (con respecto a las estrellas) unos 42 grados, es decir, 1,5 grados por día durante el período hábil de observación de cuatro semanas. Sin embargo, para un observador en la Tierra, casi una tercera parte de esta rotación queda anulada porque Venus se mueve de este a oeste (con respecto a las estrellas). Así, dos semanas después de la conjunción inferior, un punto *A* en la superficie de Venus, visto desde la Tierra, habrá girado sólo 27 grados hacia el este de *B*, su posición dos semanas antes de la conjunción inferior.

Un dividendo inesperado de las medidas del radio fue su contribución a la determinación de la presión atmosférica en la superficie de Venus. La determinación de la presión constituye un ejemplo clásico de la fecundidad de combinar líneas de investigación aparentemente disjuntas. Entre los objetivos de la misión *Mariner 5* de 1967 estaba observar la refracción de la señal de radio del vehículo espacial por la atmósfera de Venus cuando el vehículo pasaba por detrás del planeta. De los datos de refracción, Arvydas J. Kliore y sus colegas del Laboratorio de Propulsión a Chorro calcularon la presión atmosférica y la temperatura en función de la distancia al centro de masa del planeta. Sin embargo, puesto que la densa atmósfera inferior de Venus es al mismo tiempo altamente refractante y absorbente, Kliore no pudo extender las medidas del vehículo espacial por debajo de alturas en que la presión valiera unas cuantas veces la presión atmosférica en la superficie de la Tierra.

La extrapolación hasta la superficie de Venus se hizo posible tomando en consideración la temperatura en la superficie (obtenida de las mediciones de radio-emisión) y la posición precisa de la superficie (a partir de nuestras mediciones de distancias con radar). La más importante fuente de incertidumbre en la extrapolación era la ignorancia sobre la composición de la atmósfera en la proximidad de la superficie. En la hipótesis de que en la composición predomina el dióxido de carbono, Kliore y sus colaboradores calcularon que la presión atmosférica en la superficie de Venus era casi 100 veces la presión en la superficie de la Tierra. Esta predicción se comprobó directamente más tarde por sondas rusas y (mucho después) americanas que descendieron a través de la atmósfera y alcanzaron la superficie.

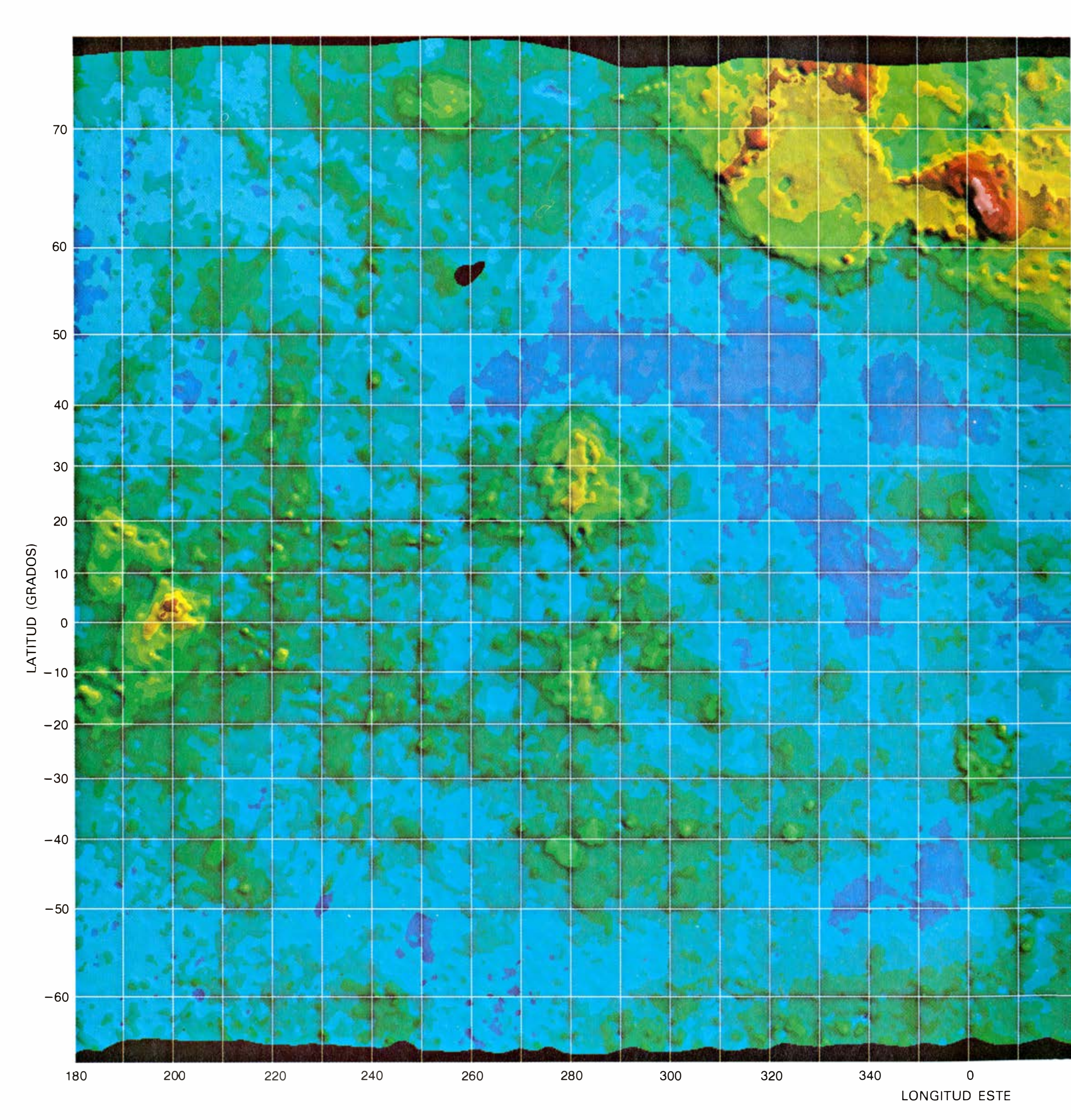
La superficie de Venus, cálida, seca y bajo una tremenda presión atmosférica, es única en el sistema solar. ¿Cómo examinar en detalle esta superficie remota, inhóspita y recubierta de nubes, cuya extensión es casi la de la terrestre? Claramente, el enfoque más factible volvía a ser el recurso al radar. El desafío consistía en extender e incrementar la sensibilidad de las técnicas que habían logrado definir el radio y la velocidad de rotación del planeta.

Como los puntos situados en la superficie de un cuerpo sólido rígido se mueven de una manera fácilmente previsible al girar el cuerpo, es posible correlacionar, con una posición específica en la superficie, el tiempo necesario para que una componente de la señal de radar haga el viaje de ida y vuelta y el corrimiento Doppler en su frecuencia al ser reflejada. Mediante análisis de los datos realizado con ordenador, se pueden cartografiar las variaciones en la difusión de la señal de radar sobre una considerable porción de la superficie del planeta, con la única condición de que el sistema de radar tenga sensibilidad suficiente a la resolución deseada.

En nuestros estudios, el haz se transmite desde la antena de 300 metros de Arecibo y está constituido por una señal de onda continua que dura unos cinco minutos y que incorpora rápidas diferencias de fase cuidadosamente orquestadas. Localizando el eco de una cierta configuración de diferencias de fase, podemos medir con precisión el tiempo invertido por la señal en el viaje de ida y vuelta. Cuando el haz transmitido llega a Venus, se ha ensanchado

hasta aproximadamente el doble del diámetro del planeta. Los ecos de radar se registran en la antena de Arecibo, cuyo transmisor se desconecta mientras se está recibiendo la señal, y simultáneamente en una parábola más pequeña, de 30 metros de diámetro, situada unos 10 kilómetros al norte. Los corrimientos Doppler en las señales registradas se determinan por análisis de frecuencias. Las diferencias de fase entre las componentes correspondientes del eco recibido en los dos puntos se analizan entonces mediante el ordenador para ayudar en la identificación y cartografiar las superficies reflectoras.

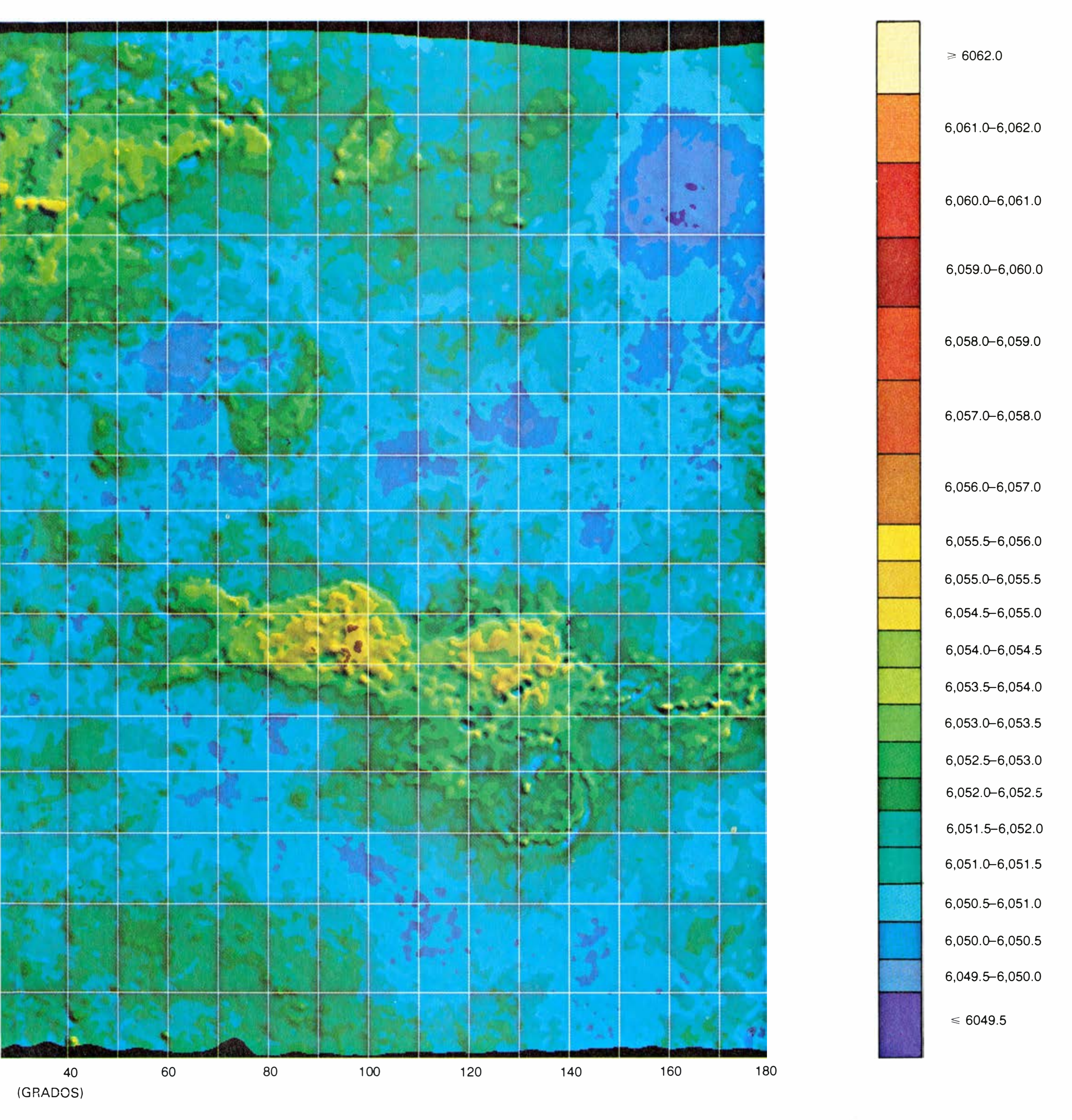
¿Qué propiedades afectan a la difusión de radioondas? Si una superficie es lisa a la escala de la longitud de onda empleada, la reflexión es especular, como la de la luz en un espejo. El haz



ALTURAS SOBRE LA SUPERFICIE DE VENUS medidas por el *Pioneer Venus 1*, pequeño vehículo espacial que se colocó en órbita en torno al planeta el 4 de diciembre de 1978. Un altímetro radárico a bordo del vehículo mide las alturas sobre la superficie de Venus siempre que la máquina pasa a una altura inferior a 4700 kilómetros en una órbita que lo lleva desde 150 kilómetros en el periapsis hasta 66.000 kilómetros en el apoapsis. La órbita limita la cobertura al 93 por cien de la superficie del planeta comprendida entre las latitudes 74 grados Norte y 63 grados Sur. La apariencia de relieve de este producto de ordenador se logra modulando la intensidad del color de las líneas de nivel como si el Sol iluminara la superficie desde el ángulo superior derecho, y sirve para poner de manifiesto las pendientes más escarpadas. El radio medio de Venus es de 6051,4 kilómetros, al que se atribuye color azul verdoso en la escala de colores para las alturas. El violeta más oscuro corresponde a un radio planetario de menos de 6049,5 kilómetros, que cubre

de radar se puede comparar al de un proyector luminoso. Si el eco de radar reflejado se recibe en la misma antena que lanza el impulso de radar, la energía reflejada especularmente se registrará sólo allí donde haya facetas lisas de la superficie situadas en ángulo recto respecto al eje de la antena. A las longitudes de onda del radar, la Luna, Mercurio, Venus y Marte aparecen densamente cubiertos por facetas cuya dimensión varía desde unas pocas longitudes de onda hasta cientos o incluso miles de longitudes de onda, y que están inclinadas al azar con respecto al plano horizontal del lugar. Lo mismo se aplicaría a muchos puntos de la superficie de la Tierra que no están cubiertos por agua o vegetación.

Los ecos de radar de los planetas interiores están, por tanto, dominados

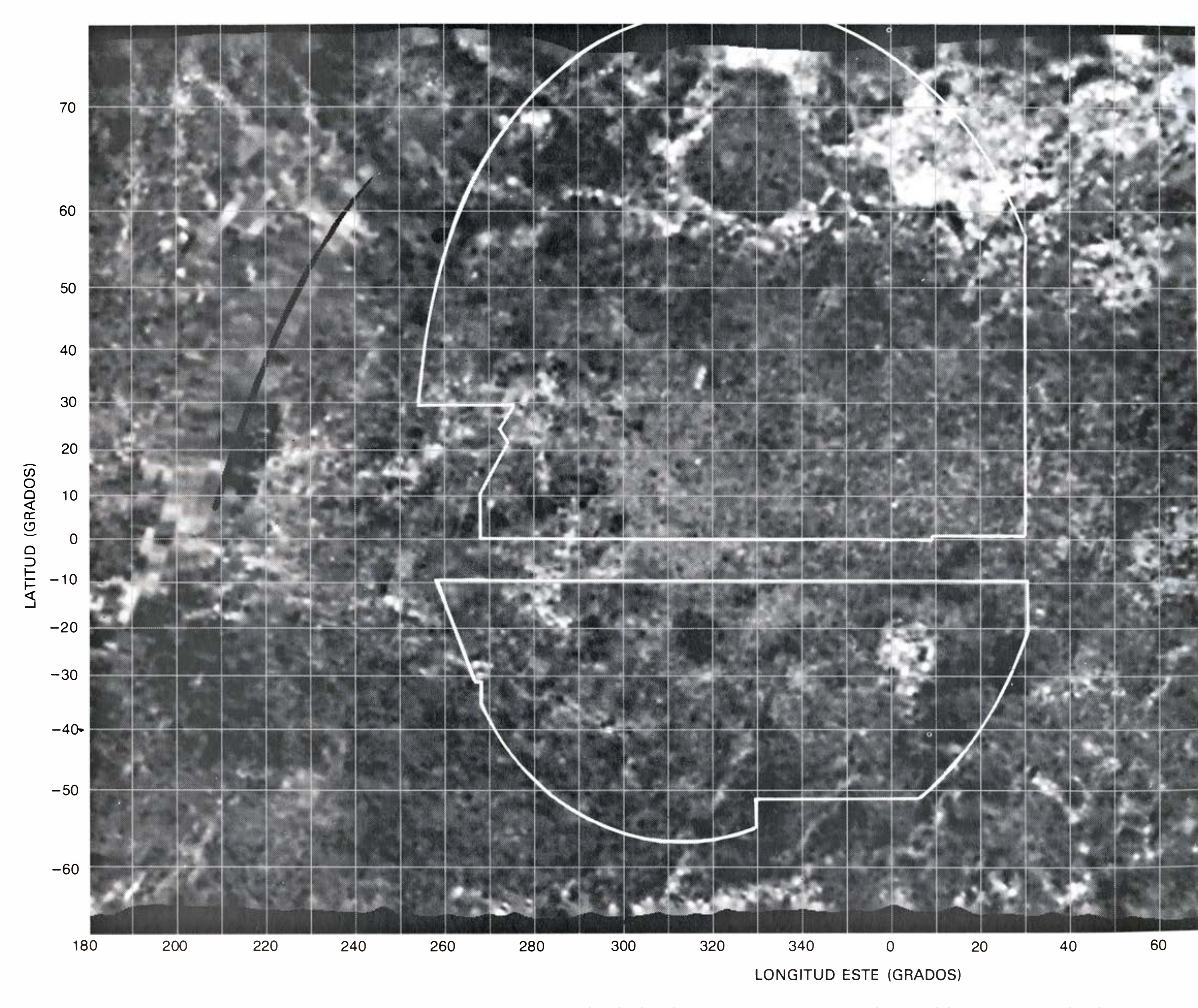


mucho menos del 1 por cien del área cartografiada. El color cambia en intervalos de medio kilómetro hasta el castaño, a una altura de 6056 kilómetros, más allá de la cual el intervalo aumenta hasta un kilómetro. La precisión de las mediciones es superior a 0,2 kilómetros. La pequeña región negra de la parte superior izquierda debe llenarse a medida que progresa la misión *Pioneer Venus 1*. La altura mayor registrada hasta ahora por el vehículo espacial queda inmediatamente encima de 6062 kilómetros en el punto blanco del área rosada dentro de Maxwell, en la parte superior central. Los 11 kilómetros de altura de la montaña sobre el radio medio del planeta exceden en dos kilómetros la altura sobre el nivel del mar del Monte Everest. La región entre las longitudes 260 y 30 grados Este debe compararse con la imagen de radar de la región en la página 23. Este mapa y otros que presentan los datos de radar del vehículo en órbita en torno a Venus fueron preparados por Eric Eliason, del Servicio Geológico de los Estados Unidos.

por la reflexión especular cuando el rayo incidente o retrodifundido es aproximadamente perpendicular a la superficie media. El fenómeno se puede comparar a la luz del Sol reflejándose en los lados de las pequeñas olas en la superficie rizada de una masa de agua. El ritmo de disminución de la potencia de la señal retrodifundida, cuando el ángulo de incidencia se aparta de la perpendicular, depende de cuán empinadas estén las caras de las facetas. La potencia total de la señal retrodifundida, por otra parte, depende primordialmente de la reflectividad de la superficie.

Las irregularidades de la superficie que tienen bordes agudos o que son pequeñas en comparación con la longitud de onda incidente dan lugar a una reflexión difusa o incoherente, que esparce la potencia incidente en pequeña cuantía a lo largo de un amplio margen de ángulos de emergencia. Cuando los ángulos de incidencia difieren en más de unos 20 grados de la vertical local, la difusión procedente de las pequeñas irregularidades generalmente domina sobre la reflexión especular. En consecuencia, las observaciones de retrodifusión de radar para las longitudes de onda decimétricas típicas, realizadas a ángulos dentro de los 10 grados de la vertical local, son sensibles principalmente a las ondulaciones de la superficie con dimensiones mayores de un metro, mientras que las observaciones realizadas con ángulos de visión más oblicuos son sensibles principalmente a las irregularidades en la superficie con dimensiones del orden de un centímetro. En conjunto, las variaciones en la difusión de señales de radar parecen depender de la geometría de la superficie más que de las variaciones en su reflectividad, que es una función de la discontinuidad dieléctrica entre la superficie del planeta y su atmósfera.

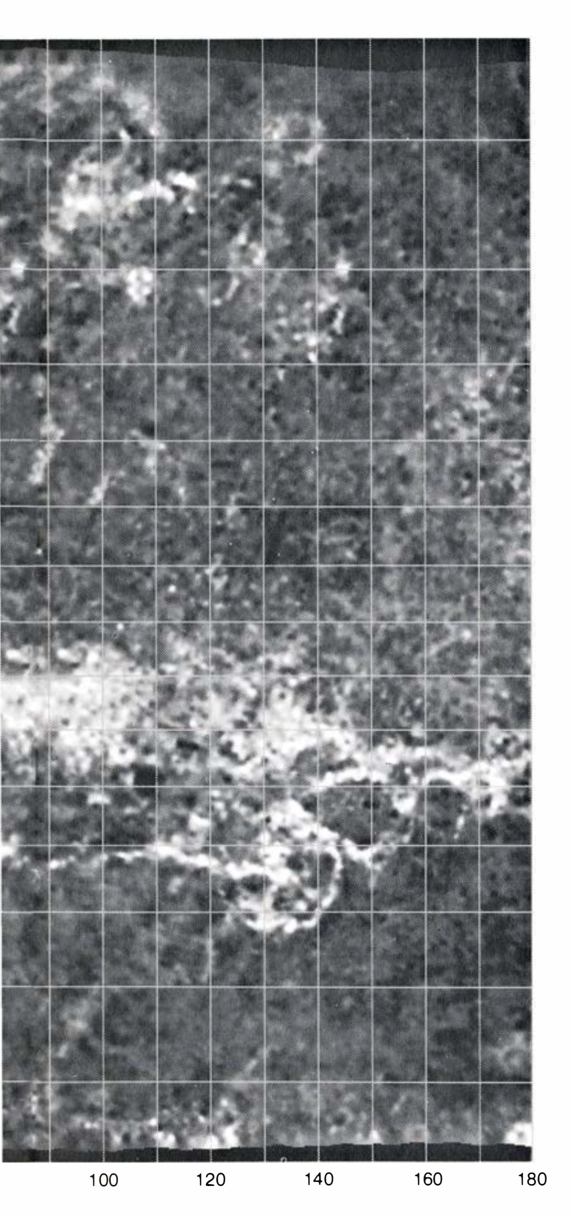
Las imágenes de Venus tomadas por radar desde la Tierra se integran a partir de observaciones realizadas sobre un amplio margen de ángulos de difusión. El eje de rotación de Venus está siempre casi en ángulo recto con la visual desde la Tierra, de modo que los datos de retrodifusión procedentes de altas latitudes en Venus se obtienen siempre a grandes ángulos de incidencia; por tanto, las variaciones en la

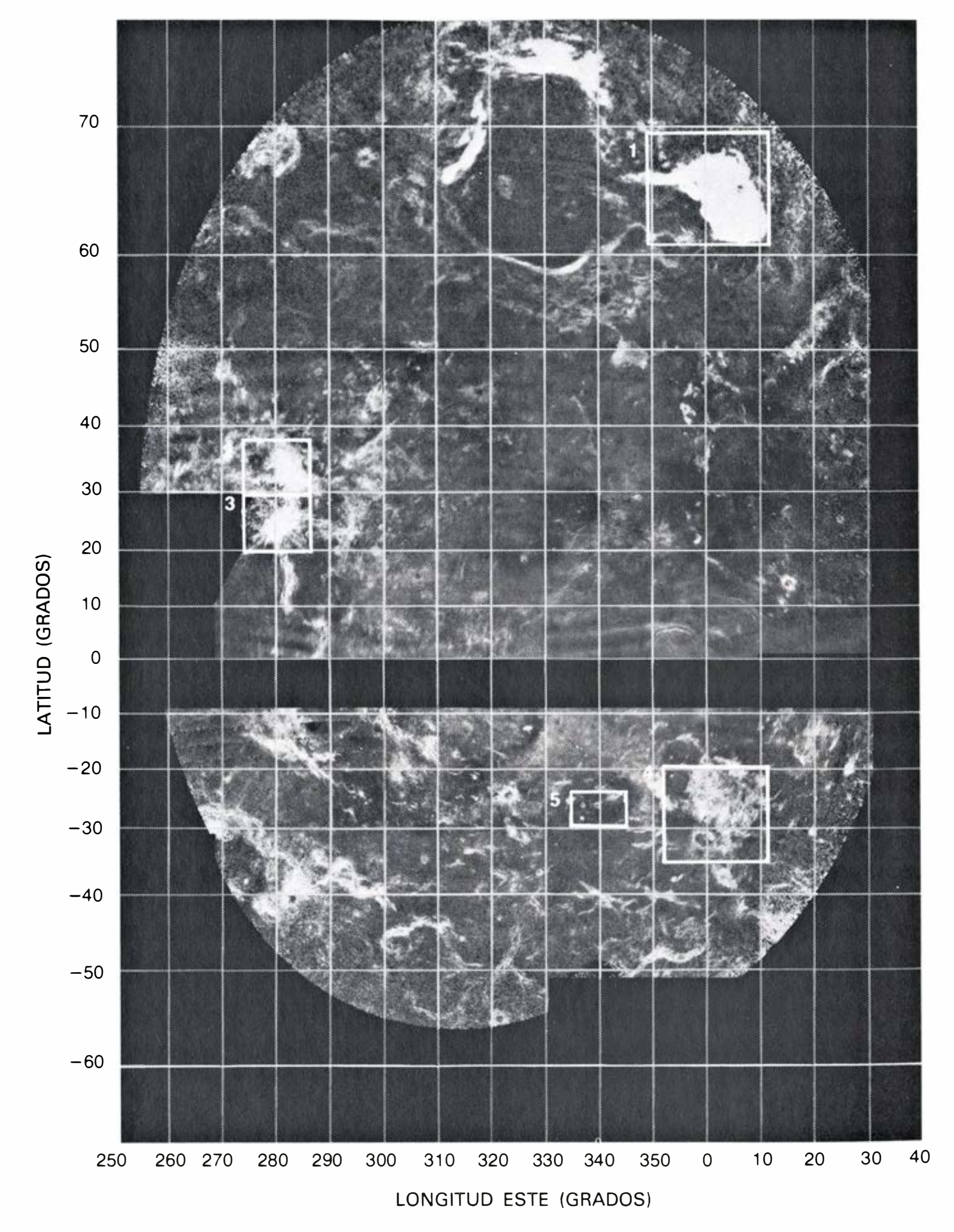


PENDIENTES DE SUPERFICIES en la escala de un metro en Venus estimadas a partir de los mismos datos que se usaron para preparar el mapa de relieve de las dos páginas anteriores. Los tonos más oscuros corresponden a pendientes medias de un grado, o inferiores, y las regiones más claras a pendientes de 10 o más grados. El largo arco negro de la parte superior izquierda y la pequeña zona negra a su derecha deberán estar completadas para el final de la misión a principios de 1981. Las regiones continentales, que son las más altas en el mapa de relieve, presentan las pendientes más abruptas. Una excepción es la meseta Lakshmi, al oeste de Maxwell. La región delimitada en blanco es la cara de Venus que se ha cartografiado

estructura de la superficie que los datos ponen de manifiesto tienen dimensiones inferiores a las de una longitud de onda. A latitudes más bajas, en las que el ángulo de visión de radar se acerca más a la perpendicular, la difusión está modulada por las inclinaciones y ondulaciones, en la superficie, de dimensiones superiores a la de una longitud de onda. Cuando disminuye la distancia a los polos del planeta, la cobertura queda limitada por el creciente espesor de atmósfera que ha de atravesar la señal de radar y la alta absorción de ésta que resulta. El rendimiento de retrodifusión decrece también para ondas que inciden sobre la superficie muy apartadas de la normal, lo que también contribuye a reducir la intensidad de los ecos procedentes de altas latitudes.

A medida que Venus gira, presenta diferentes caras a la Tierra; cabe pensar pues, que, con tiempo suficiente, se podría cartografiar la totalidad de la superficie. Pero no es este el caso; la intensidad de la señal de radar transmitida que cae sobre la superficie y la proporción de esa energía que es devuelta a la Tierra en forma de eco decrecen ambas en razón inversa al cuadrado de la distancia al objetivo, de tal manera que la intensidad del eco guarda con la intensidad de la señal transmitida una relación inversa a la cuarta potencia de la distancia. La posibilidad de cartografíar con alta resolución queda por tanto limitada a unos pocos meses en la conjunción inferior, es decir, durante la época, que se repite aproximadamente una vez cada 19 meses, en que Venus está alineado con la Tierra y el Sol y está, por tanto, a la mínima distancia de la Tierra. En dicha época, el efecto combinado de la rotación retrógrada de Venus y el movimiento hacia el Oeste del planeta en el cielo hacen que el punto subterral de Venus, definido por una línea que pasa por el centro de ambos planetas, cambie menos de 0,8 grados por día. Por tanto, en el período de observación más favorable la rotación aparente es muy pequeña. Aun así, debería esperarse que el punto subterral de Venus migrase sistemáticamente de una conjunción inferior a la siguiente. Curiosamente, esto no ocurre. Venus gira casi exactamente cuatro veces, cuando se mira desde la Tierra, entre conjunciones inferiores sucesi-





mediante el radar emplazado en la Tierra. A la derecha hay una versión, a la misma escala, del mapa obtenido con el radar emplazado en la Tierra. Puede verse la considerable semejanza entre las imágenes producidas por el radar situado en la Tierra y el del vehículo orbital. Resulta claro que la aspereza en pequeña escala que aparece en el mapa hecho desde la Tierra va acompañada en la mayor parte de los lugares por rugosidad en gran escala, que aparece brillante en la imagen del vehículo orbital. Los rectángulos superpuestos sobre la imagen hecha desde la Tierra delimitan cinco áreas representadas a mayor escala en las dos páginas siguientes. *1* señala dónde está Maxwell; *2*, Rhea Mons; *3*, Theia Mons; *4*, Alfa; *5*, tres accidentes crateriformes.

vas. Si esto es accidental o dictado por la dinámica orbital es materia de debate entre los teóricos.

La porción de la superficie de Venus que se puede cartografiar con buena resolución desde Arecibo muestra detalles de tamaños comprendidos entre 10 y 20 kilómetros [*véase la ilustración de la página 23*]. Las áreas brillantes representan la difusión de radar reforzada; corresponden, pues, a regiones desusadamente ásperas. La región grande y extremadamente brillante centrada a 65 grados de latitud Norte y cinco grados de longitud Este es la llamada Maxwell (en honor del físico James Clerk Maxwell). Se divisó por primera vez hace algunos años en las primitivas observaciones de radar con baja resolución. Cuando se examina Maxwell en imágenes de contraste reducido, que revelan detalles adicionales, se puede apreciar un agujero oscuro casi circular y una "granulación" bien marcada que va de noroeste a sureste [*véase la ilustración superior de esta página*]. Hacia el oeste de Maxwell hay un accidente con borde, en forma de pera y bastante oscuro (y por tanto liso) que se llama meseta Lakshmi (nombre de una diosa hindú). Como el propio planeta tiene el nombre de una diosa, los accidentes de su superficie se están bautizando con nombres de mujer; las únicas excepciones son Maxwell y los nombres de otros dos lugares, que se han venido usando durante más de diez años.

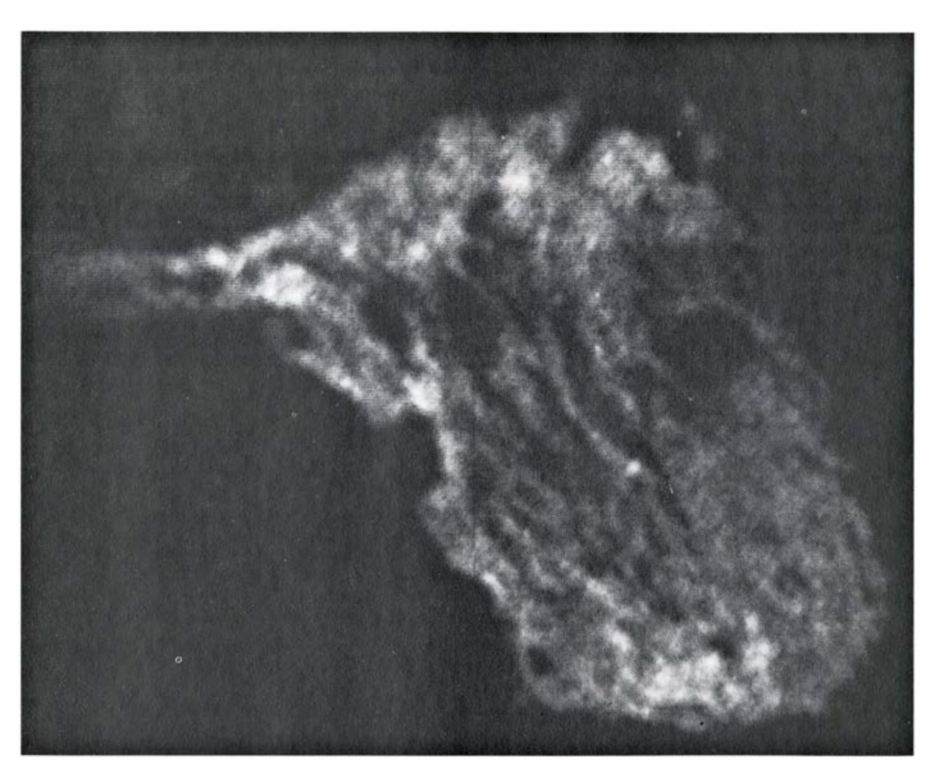
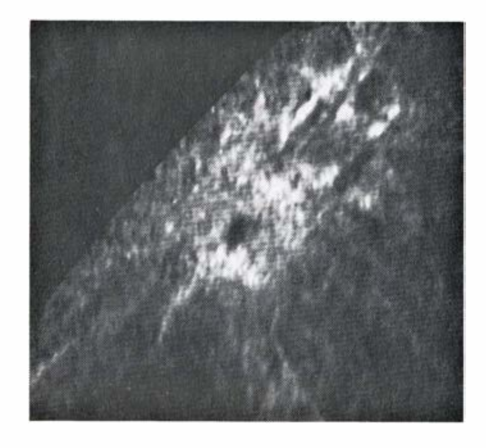


IMAGEN DE MAXWELL HECHA DESDE LA TIERRA, deducida de las mismas observaciones de Arecibo usadas para producir el mosaico grande que aparece en la página 23, pero representada aquí a contraste reducido para que puedan verse los detalles interiores. La resolución en superficie es de unos 10 kilómetros. Maxwell, que mide unos 750 kilómetros de Norte a Sur, incluye la mayor altura del planeta: 11 kilómetros por encima de la media planetaria. La región muestra una granulación definida de noroeste a sudoeste. El "agujero" circular oscuro a la derecha puede ser un cráter parcialmente relleno de lava.





REGION BETA, cartografiada por radar desde la Tierra. Contiene lo que pueden ser dos picos volcánicos. Theia Mons (*izquierda*) ha sido identificado por su forma circular y suave pendiente como un enorme volcán de escudo, de unos 5 km de altura. La región central oscura es presumiblemente una caldera volcánica. Los rayos radiantes hacia fuera pueden ser ríos de lava. (La región negra sin accidentes en la parte superior izquierda no se ha cartografiado todavía.) Rhea Mons (*derecha*), quizá sea también volcánico, pero el gran surco que pasa por su centro hace su interpretación incierta.

Hay otros dos accidentes brillantes que destacan. Uno, llamado Alfa, está en el meridiano cero a unos 25 grados de latitud Sur. El otro, Beta, está centrado a unos 25 grados Norte y 283 grados Este. Un primer plano de Alfa, a una resolución de unos 5 kilómetros, revela una sorprendente granulación de nordeste a suroeste que recuerda las líneas de cuencas formadas por fallas que se encuentran en Nevada y lugares adyacentes del suroeste de los Estados Unidos. Al suroeste de Alfa, casi exactamente en el meridiano cero y a 32 grados de latitud Sur, hay un prominente accidente en forma de anillo con una brillante mancha central que se parece a muchos cráteres de impacto de los que se observan en la Luna y Mercurio. Este accidente se ha denominado Eva; el meridiano que pasa por la mancha central brillante se convertirá probablemente en la referencia fija en el planeta que sirva de origen para el sistema oficial de longitudes de Venus.

Beta, accidente con orientación norte-sur, incluye una región central de la que parten rayos hacia fuera. Las observaciones de radar realizadas por Goldstein muestran que la región central es una ancha montaña en forma de escudo con una pequeña depresión en la cima. R. Stephen Saunders y Michael C. Malin, del Laboratorio de Propulsión a Chorro, han propuesto que el accidente es un volcán de escudo. De unos 1000 kilómetros de diámetro, su tamaño puede compararse con los grandes volcanes de Marte.

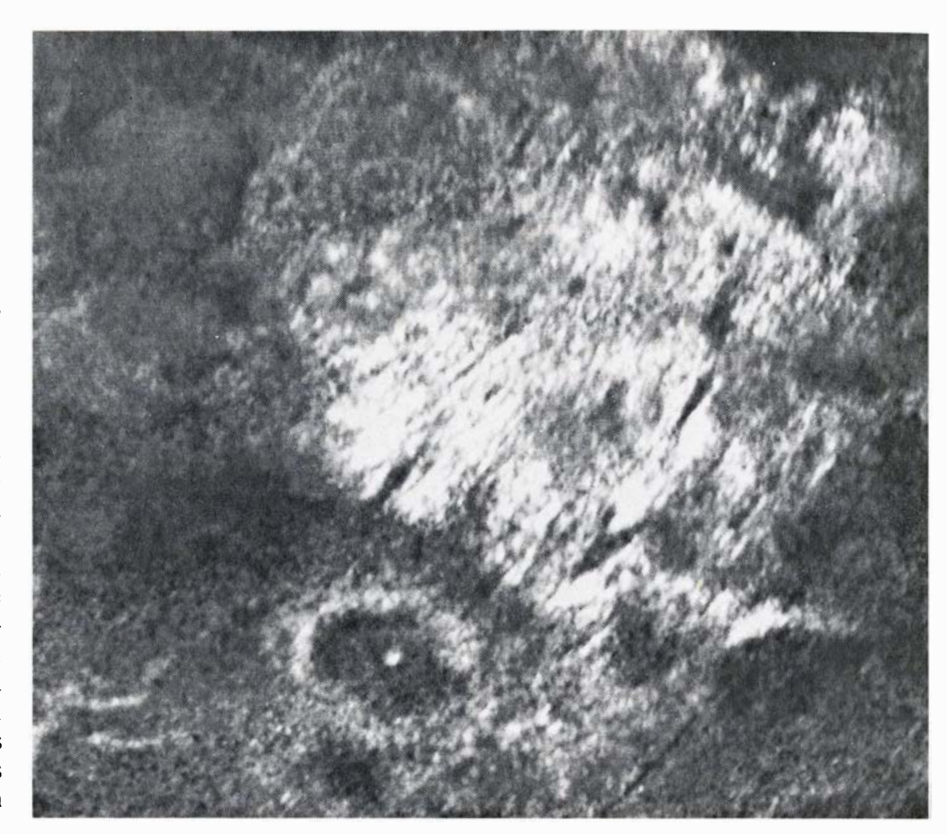
Justamente al norte del ecuador, a unos 355 grados de longitud Este, corre un arco surcado a lo largo de unos 1000 kilómetros. Como este accidente cae casi directamente debajo del haz del radar, las variaciones de intensidad del eco se deben sobre todo a pendientes en gran escala de la topografía. El accidente está formado en realidad por dos crestas paralelas, cada una de unos dos kilómetros de altura, separadas por un valle de 90 kilómetros de anchura. La máxima pendiente perpendicular a las crestas se acerca a los seis grados, valor impresionante para un accidente tan grande. No existen accidentes exactamente análogos en la Tierra, de

modo que sólo se puede especular acerca de su origen.

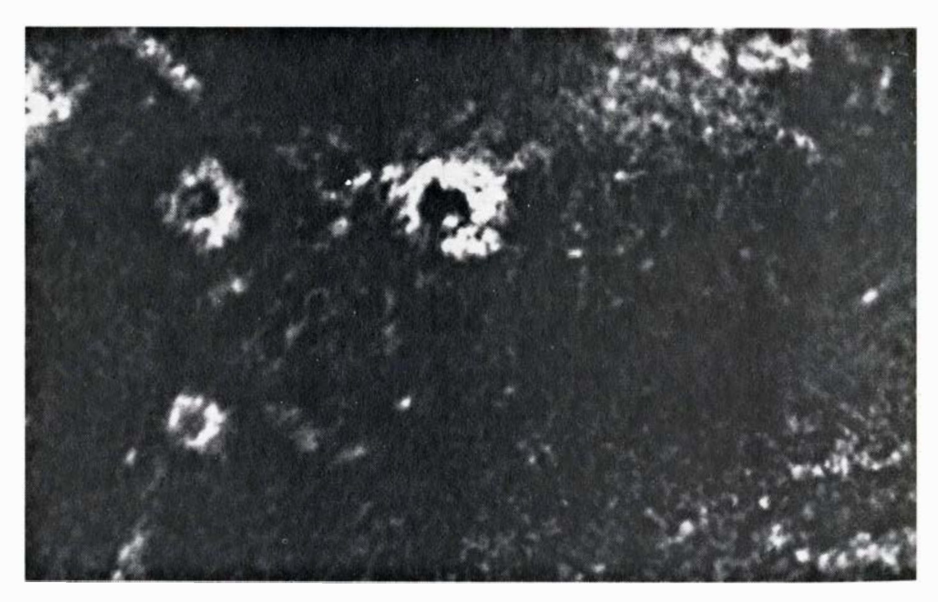
El examen detallado de las imágenes de radar, tomadas desde la Tierra, revela más de dos docenas de estructuras en forma de anillo que se supone pueden ser cráteres de impacto fuertemente modificados o quizás indicaciones de vulcanismo. Bárbara A. Burns, del Observatorio de Arecibo, ha representado el número de tales accidentes en función de su diámetro y ha comparado el resultado con representaciones similares de número frente a diámetro para otros planetas y la Luna. Para cuerpos con superficie visible a las longitudes de onda de la luz, la distribución de cráteres para fracciones escogidas de la superficie concuerda en general con las estimas del número de cráteres que deberían haber sido producidos por objetos que chocasen con el cuerpo principal a lo largo de la vida del sistema solar. Donde la distribución de cráteres visibles difiere de esas estimas, se puede deducir que algunos cráteres han sido borrados por una renovación de la superficie.

De acuerdo con el análisis de Burns, la superficie de Venus presenta aproximadamente el número de cráteres de diámetro superior a 80 kilómetros que los modelos de formación de cráteres predicen que se habrían producido en los últimos 600 a 1000 millones de años. Sería de esperar que los cráteres de diámetro inferior a unos 20 kilómetros fueran mucho más raros en Venus que en otros lugares, porque los meteoritos que forman esos cráteres se queman en gran proporción al atravesar la densa atmósfera del planeta antes de alcanzar su superficie. Esta hipótesis no puede comprobarse, porque los accidentes semejantes a cráteres menores de 20 kilómetros de diámetro están por debajo de la resolución de todos los mapas actuales de radar (excepto de una insignificante fracción de los mismos). Los mapas sí ponen de manifiesto, en cambio, que el número de cráteres con diámetro entre 20 y 80 kilómetros es sensiblemente inferior al predicho. La discrepancia, sin embargo, puede reflejar la dificultad de identificar cráteres de este intervalo de diámetros en los mapas de radar.

Pese a la aparente concordancia con la predicción para el número de cráteres grandes, los accidentes en forma de anillo observados en Venus difieren, si atendemos al detalle, de los cráteres de impacto típicos de la Luna, Mercurio y Marte. Se debe, pues, ser cauto a la hora de identificar los accidentes de Venus con cráteres de impacto. Los perfiles topográficos de regiones limitadas de Venus, hechos a partir de las observaciones de radar desde la Tierra, muestran algunos de los bordes característicos que serían de esperar de un cráter de impacto si se supone también que la superficie caliente del planeta es suceptible de deformación plástica. A pesar de ello, muchos de los bordes no son completamente circulares y la extensión radial de la rugosidad en pequeña escala cerca de ellos es mayor que la que se observa en los cráteres de impacto de otros cuerpos celestes. Podrá alcanzarse una mejor comprensión de los accidentes crateriformes de Ve-



REGION ALFA, cartografiada con una resolución de unos ocho kilómetros en esta imagen hecha desde la Tierra. Las marcas paralelas que van del nordeste al suroeste recuerdan la sucesión de crestas y valles con fallas que se encuentran en Nevada y regiones adyacentes del suroeste de los Estados Unidos. El accidente en forma de anillo se ha denominado Eva. De unos 200 kilómetros de diámetro, se trata probablemente de un antiguo cráter de impacto. Se ha propuesto que la brillante mancha central sirva de meridiano cero para el sistema de longitudes del planeta. Se encuentra a 32 grados al sur del ecuador.



TRES ACCIDENTES en forma de anillo que se encuentran a unos 1500 kilómetros al oeste de Alfa. El mayor mide unos 100 km. de diámetro; la resolución es de unos cinco km. La extensión radial de la rugosidad del borde montañoso y el perfil del relieve difieren de los detalles comparables alrededor de los cráteres de impacto conocidos. No puede decirse aún que los anillos sean cráteres de impacto.

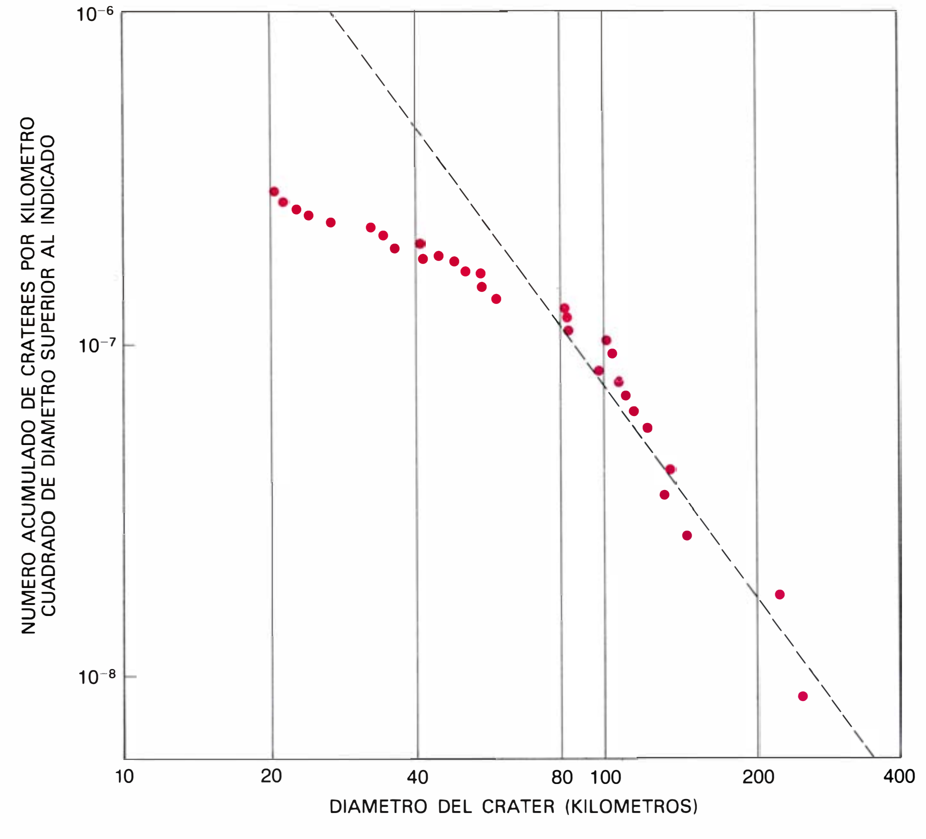
nus cuando se disponga de mejores modelos físicos de las propiedades mecánicas de la superficie caliente y de modelos que puedan predecir los efectos de la densa atmósfera sobre el comportamiento del material expulsado por un cráter, bien sea por impacto o por vulcanismo. Pero, incluso sin tales modelos, la génesis de tales accidentes puede aclararse mediante imágenes de radar hechas a alta resolución.

En las observaciones de radar de Venus hechas desde la Tierra falta en gran parte información sobre el relieve superficial. Goldstein y sus colegas, del Laboratorio de Propulsión a Chorro, han aplicado con éxito la interferometría entre varias estaciones para cartografiar el relieve de unas pocas superficies pequeñas del planeta; con anterioridad, varios grupos determinaron algunas características topográficas por mediciones directas de distancia mediante el radar. Ambos tipos de medidas, sin embargo, se han limitado a regiones cercanas al ecuador y no han ayudado a aclarar la naturaleza de los grandes accidentes que se ven en las imágenes de aspereza y contextura de la superficie. El conocimiento de relieve de un accidente es crucial para interpretar su naturaleza y comprobar su origen y evolución.

A la vista de esta necesidad, la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA) aprobó la inclusión de un pequeño altímetro radárico a bordo del vehículo espacial *Pioneer Venus I,* colocado en órbita alrededor de Venus el 4 de diciembre de 1978. A medida que el altímetro se mueve en torno al planeta, va midiendo la distancia a la superficie que tiene debajo. La telemetría del vehículo espacial, realizada simultáneamente desde la Tierra, establece la órbita del vehículo respecto al centro de masa del planeta. Substrayendo la altura del vehículo espacial de su distancia al centro de masa se obtiene el radio del planeta en la vertical del punto observado. Aunque el experimento del vehículo espacial carece de la resolución de las mejores observaciones hechas desde la Tierra, ha proporcionado un cuadro casi global del relieve de la superficie con una exactitud vertical de unos 200 metros y una resolución horizontal típica de 100 kilómetros.

La misión *Pioneer Venus 1* se proyectó primordialmente para medidas de la atmósfera y la ionosfera del planeta. Para optimizar esas observaciones, el vehículo espacial se situó en una órbita fuertemente excéntrica, que variaba desde un mínimo de unos 150 kilómetros sobre la superficie en el periastro, donde la atmósfera es suficientemente densa para ser analizada directamente, hasta un punto máximo de más de 66.000 kilómetros en el apoapsis, donde se pueden obtener imágenes de grandes áreas de la atmósfera superior y sus nubes en longitudes de onda del visible, infrarrojo y ultravioleta. El plano de la órbita del vehículo espacial está inclinado 74 grados con respecto al ecuador, de modo que las regiones del planeta situadas más hacia el polo de los 74 grados de latitud Norte o Sur son inaccesibles al altímetro radárico. Hay una limitación ulterior que proviene de la pérdida de intensidad de la señal con la altura; no se pueden hacer medidas desde altitudes superiores a 4700 kilómetros sobre la superficie. El periapsis (o periastro) se encuentra a unos 17 grados de latitud Norte, de modo que la limitación en la altitud no reduce la cobertura en el hemisferio Norte. En el hemisferio Sur, sin embargo, el límite se alcanza a una latitud de 63 grados. Entre esos dos paralelos queda el 93 por cien de la superficie, que se hace accesible a la observación a medida que el planeta gira lentamente bajo el plano de la órbita del vehículo espacial. Este tiene un período orbital de 24 horas; por tanto, entre cada paso sucesivo por el periapsis, Venus gira 1,5 grados. Cuando han transcurrido 243 días, la rotación completa del planeta ha presentado todas las longitudes a la observación altimétrica.

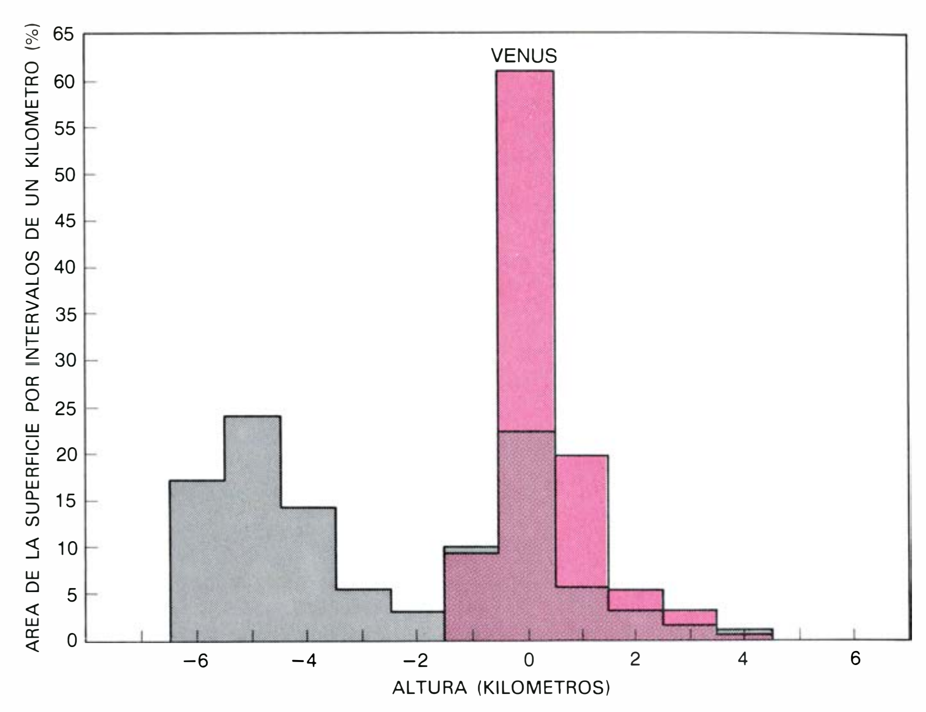
La inspección de los datos altimétricos del vehículo en órbita en torno a Venus revela una sorprendente diferencia entre la figura media de Venus y la de la Tierra. Como resultado de la considerable velocidad de rotación de esta última, su radio ecuatorial es unos 21 kilómetros mayor que el radio polar. En Venus, donde la velocidad de rotación es 243 veces menor que la de la Tierra, debería haber una diferencia despreciable entre los radios polar y ecuatorial si la superficie fuera homogénea y hubiese alcanzado el equilibrio gravitatorio. Esta hipótesis ha sido confirmada. El ochenta por ciento de la superficie cartografiada cae dentro de un intervalo de alturas de dos kilómetros y el 60 por ciento cae dentro de un intervalo de un kilómetro. Venus tiene varios "continentes" que se elevan dos kilómetros o más por encima de la altura media de la superficie (equivalente a un radio de 6051,4 kilómetros),



DISTRIBUCION ACUMULATIVA de accidentes en forma de anillo en Venus. Dicha distribución sugiere que, si fueron creados por impactos de meteoritos, se adaptan a un modelo teórico (*línea inclinada*) del número de cráteres de impacto que se habrían producido en los pasados 600 a 1000 millones de años. El modelo se ha deducido a partir de recuentos de cráteres en la Luna, Mercurio y Marte. La concordancia es buena para accidentes en forma de cráter de diámetro superior a los 80 kilómetros. Los objetos que produjeran cráteres menores de 20 kilómetros tenderían a quemarse en la densa atmósfera envolvente. Esto no explica la aparente escasez de cráteres menores de 80 kilómetros.

pero constituyen sólo aproximadamente el 5 por ciento del área total observada. En la Tierra, aproximadamente el 35 por cien de la superficie queda dentro del límite exterior de las plataformas continentales y el 65 por ciento es oceánica. Las regiones continentales de la Tierra no son en general más altas que las de Venus. Una gran proporción del fondo de los océanos terrestres, sin embargo, se encuentra entre cinco y seis kilómetros por debajo del nivel del mar.

Cuando se compara el mapa de Venus basado en los datos del altímetro orbital con la imagen de radar hecha desde la Tierra (basada en la rugosidad) aparece un hecho sorprendente: a las longitudes de onda del radar, las regiones más altas tienden también a ser las más ásperas. Así Maxwell, con mucho la más brillante (es decir, la más rugosa) de entre las grandes características que aparecen en el mapa de retrodifusión hecho desde la Tierra, resulta ser al mismo tiempo la más alta, elevándose por encima del resto del planeta a alturas tan grandes como 11 kilómetros sobre su nivel medio. La meseta Lakshmi, al oeste de Maxwell, es una excepción a la regla. Aunque se encuentra a una altura comprendida entre dos y medio y tres kilómetros por encima de la media, presenta una de las más lisas entre las grandes superficies del planeta. La meseta está bordeada al norte y al oeste por cadenas montañosas bastante altas. La totalidad del continente elevado se ha denominado Ishtar, diosa babilonia del amor. La otra gran estructura continental, llamada Afrodita (la contrapartida griega de Ishtar), se extiende a lo largo y justamente al sur del ecuador, entre las longitudes 70 y 140 grados Este. Aunque Afrodita no es tan alta como Ishtar, cubre un área casi doble, hecho enmascarado por la distorsión asociada a la proyección de Mercator.



COMPARACION DEL RELIEVE de Venus (*en color*) y de la Tierra (*en negro*), donde se muestra el marcado contraste entre los dos planetas. La distribución de alturas de la superficie se representa, en intervalos de un kilómetro, en función del área de tal superficie. Para Venus, la altura se mide desde una esfera con el radio medio del planeta, 6051,4 kilómetros. Para la Tierra, la referencia es el nivel del mar. La doble naturaleza de la Tierra es clara: 65 por ciento oceánica y 35 por ciento continental. El 65 por ciento fuera de la plataforma continental está en promedio a unos cinco kilómetros bajo el nivel del mar. En contraste, alrededor del 60 por ciento de la superficie de Venus se halla en un intervalo de 500 m de radio. Venus ha evolucionado geológicamente en forma muy parecida a como lo ha hecho la Tierra.

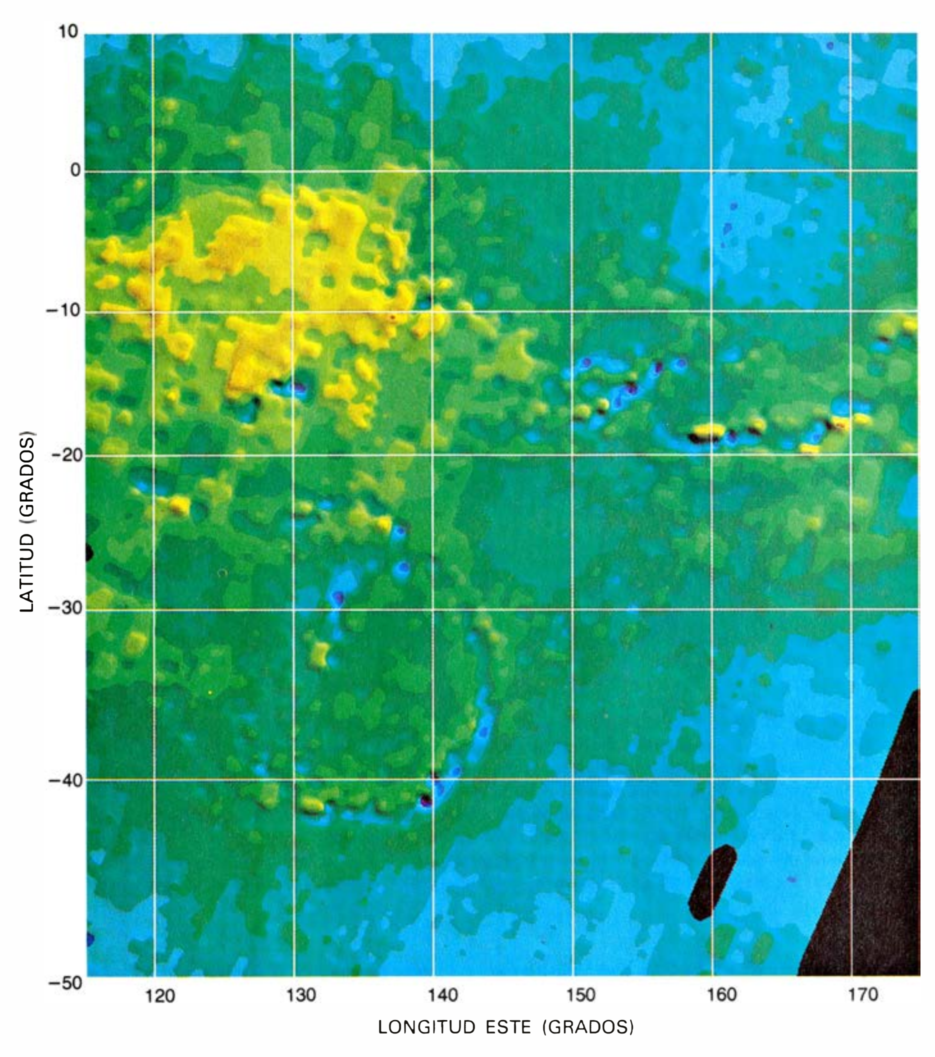
Puesto que Venus tiene una especie de continentes, es natural preguntarse si, lo mismo que los continentes de la Tierra, representan regiones que están en equilibrio gravitatorio con sus alrededores. Ese estado, conocido por equilibrio isostático, requiere que el relieve topográfico esté apoyado por la tendencia a elevarse que proviene de una menor densidad, de igual manera que un iceberg flota en el agua. Así, los continentes de la Tierra, que están en equilibrio isostático, se elevan por encima del fondo de los océanos circundantes en una cuantía que depende principalmente de la densidad y espesor de los continentes. El grado de equilibrio isostático en Venus se puede tantear estudiando las pequeñas perturbaciones que se producen en el movimiento del vehículo orbital cuando éste pasa por encima de las grandes estructuras elevadas. William L. Sjogren, del Laboratorio de Propulsión a Chorro, que ha examinado tales perturbaciones en los campos gravitatorios de Ishtar y Afrodita, ha llegado a la conclusión de que esas regiones se han acomodado en alto grado en un estado de mínima energía gravitatoria.

Si el equilibrio gravitatorio da cuenta del relieve en gran escala observado en Venus, hay casi la obligación de suponer que en la corteza del planeta se han producido importantes desniveles de densidad por un proceso de diferenciación. En la Tierra, la diferenciación se ha producido por la fusión en gran escala del interior del planeta. La densa atmósfera de dióxido de carbono con importante mezcla de argón de Venus suministra indicaciones adicionales de una fusión comparable allí. Dicha atmósfera apoya la hipótesis de un escape casi total de gases provinientes de un interior caliente. Una señal ulterior de la diferenciación química de Venus es la apreciable cantidad de radiactividad medida en la superficie del planeta por las sondas rusas Venera.

Hacia el este de Ishtar y Afrodita, el relieve se hace complicado. La región al este y sureste de Afrodita es particularmente caótica; es aquí donde las configuraciones que sugieren actividad tectónica se vuelven más claras. Un accidente aproximadamente circular de 1800 kilómetros de diámetro, centrado a 35 grados de latitud Sur y 135 grados de latitud Este, puede ser el borroso resto de un gigantesco y antiguo cráter de impacto [*véase la ilustración de la página siguiente*].

En la región inmediatamente al Norte de 20 grados de latitud Sur y entre 150 y 175 grados de longitud Este hay un notable accidente que ofrece la indicación hasta ahora más clara de actividad tectónica (y consiguientemente, de dinámica interna) en Venus. Se trata de un valle, largo y moderadamente recto, que tiene un agudo relieve vertical que se acerca a cuatro kilómetros. En algunos lugares muestra una porción lateral que recuerda mucho las fallas de las fosas tectónicas terrestres.

Considerando ahora otro aspecto de la superficie de Venus que se ha descubierto merced a las observaciones por radar, hemos tratado de correlacionar la dispersión del tiempo de ida y vuelta del eco de radar en incidencia casi vertical observado por el altímetro del vehículo espacial con medidas de la



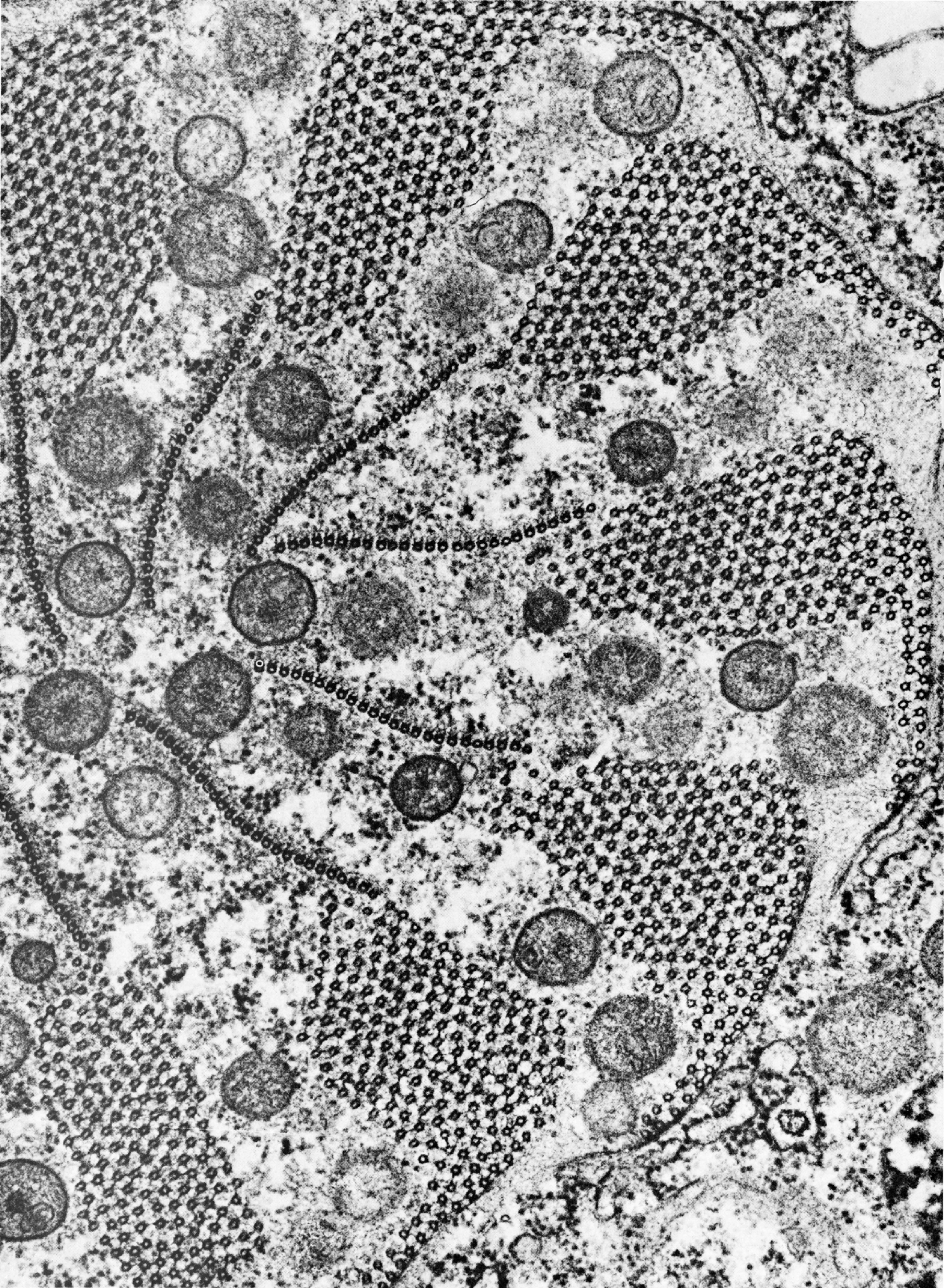
REGION AL ESTE DE AFRODITA, basada en altimetría del vehículo orbital. Aquí aparece representada con el mismo código de colores y técnica de sombreado usada en el mapa global de las páginas 26 y 27. Se trata de una región particularmente caótica. En la parte central derecha hay una serie de valles bastante estrechos flanqueados por colinas alargadas. La causa más probable de tales accidentes debe buscarse en el movimiento tectónico en la corteza o debajo de ella. Centrado a 35 grados de latitud Sur y 135 grados de longitud Este se aprecia lo que parece ser un accidente circular de unos 1800 kilómetros de diámetro. Posiblemente, es lo que queda de un gigantesco cráter de impacto.

energía retrodifundida en haces alejados de la vertical y lanzados desde la Tierra. La primera suministra información acerca de la inclinación media de facetas reflectoras con dimensiones de un metro o más. Los valores medios de la inclinación de las facetas se estimaron a partir de las observaciones de radar del vehículo espacial en el mismo instante y a la misma resolución que el análisis de la altura. Cuando los resultados se representan en una escala de grises, proporcionan un mapa generalmente semejante, donde los mapas se superponen, a la configuración de asperezas en la escala de un centímetro que aparece en las observaciones realizadas desde la Tierra [*véanse las ilustraciones de las páginas 28 y 29*]. La semejanza indica presumiblemente que la aspereza de la superficie tiene componentes que se extienden desde dimensiones de algunos centímetros a dimensiones de muchos metros. Una desviación significativa de esta correlación aparece al nordeste de Maxwell, donde los componentes de tamaño centimétrico (la imagen obtenida desde la Tierra) y las de tamaño métrico (la imagen obtenida desde el vehículo espacial) están distribuidas de manera notablemente diferente.

De la síntesis de todos los datos actualmente disponibles empieza a emerger un cuadro de un planeta, de casi el mismo tamaño que la Tierra, cuya superficie ha sido modificada por los mismos procesos que dieron forma a la superficie de la Tierra si exceptuamos la erosión por la lluvia. El movimiento tectónico de grandes placas en la corteza no parece haber desempeñado en la alteración de la superficie el papel dominante que ha representado en la Tierra; la distribución (y probablemente la cantidad) de material continental ligero es muy diferente en Venus de lo que es en la Tierra. Si los accidentes anulares demuestran ser la marca de antiguos impactos, debe deducirse que gran parte de la superficie de Venus tiene una antigüedad de unos mil millones de años. La conclusión provisional es que el planeta ha evolucionado geológicamente en forma muy parecida a como lo ha hecho la Tierra, pero no en el mismo grado. Por otra parte, Venus no ha preservado tanto de su primitiva historia como han hecho la Luna y Mercurio.

Quedan interrogantes por despejar, evidentemente. ¿Cuál es el influjo relativo de los tres procesos más importantes –impacto meteorítico, vulcanismo y tectónica– que parecen haber modificado la superficie de Venus? ¿Tiene Venus un núcleo central de hierro-níquel como lo tiene la Tierra? ¿Hay alguna indicación en la superficie de Venus de la existencia de movimientos convectivos en el manto subyacente? ¿Están los volcanes todavía arrojando substancias volátiles a la atmósfera? Observaciones de radar relativamente sencillas han descorrido el velo de nubes y nos han permitido un primer vistazo completo de la superficie. La resolución alcanzada hasta ahora es, sin embargo, insuficientemente fina para contestar muchas preguntas de manera satisfactoria. Un conocimiento más profundo precisa de imágenes con una resolución de cientos de metros o menos, tales como las que el *Mariner 9* ha hecho de la superficie de Marte a la longitud de onda de la luz.

La NASA tiene ahora en estudio el lanzamiento, a final de este decenio, de un vehículo espacial que puede ser portador de un modelo avanzado de radar de apertura sintética en una órbita circular baja alrededor de Venus. Llamado *radar orbital de imágenes de Venus* (VOIR, de "Venus Orbiting Imaging Radar"), este sistema de radar avanzado podrá cartografiar la totalidad de la superficie del planeta a una resolución de aproximadamente medio kilómetro, comparable a la resolución obtenida por el *Mariner 9* en longitudes de onda visibles. A esa resolución, el *Mariner 9* pudo establecer sin ambigüedad que en Marte había vulcanismo y actividad tectónica, definir unidades geológicas en la superficie del planeta e indicar sus edades relativas. En resumen, *Mariner 9* pudo proporcionar una historia geológica verosímil de Marte. Ahora que la tecnología para estudiar la superficie de un planeta por radar ha alcanzado su madurez, puede anticiparse un esfuerzo con igual éxito para comprender la historia geológica de Venus.



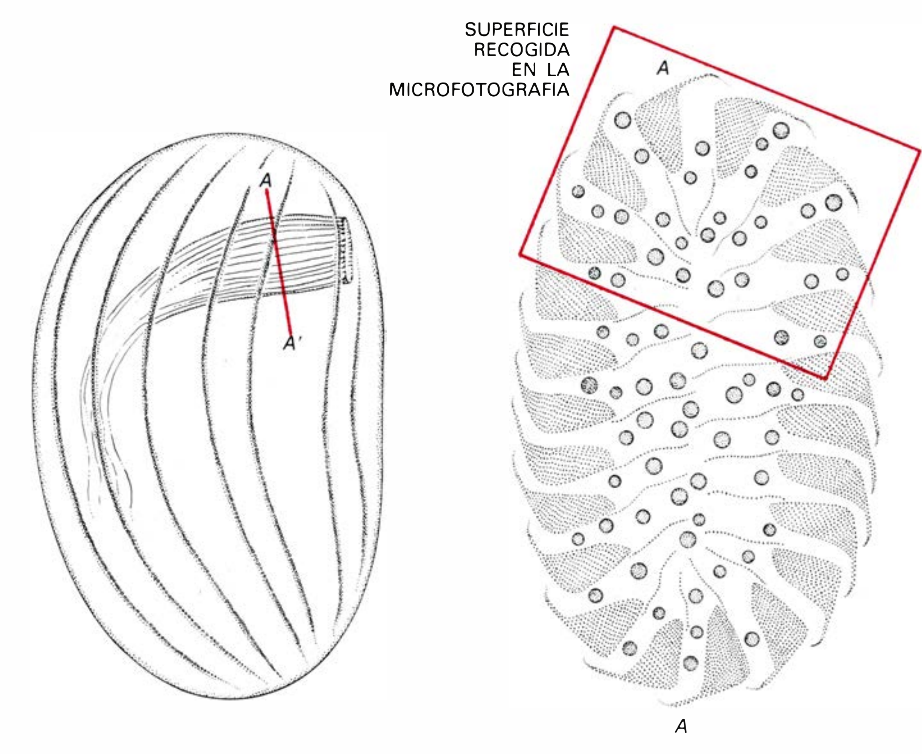
Microtúbulos

Son orgánulos estructurales que existen en todas las células nucleadas. Ensamblados como un andamiaje a partir de subunidades proteicas, participan en la división, en el movimiento y en el mantenimiento de la forma celular

Pierre Dustin

Uno de los aspectos más fascinantes de la biología es el continuo redescubrimiento de la evidente unidad que existe entre todas las células vivas, unidad que va desde la universalidad del ADN como material genético hasta la presencia, tanto en organismos unicelulares como en las células de plantas y animales superiores, de las mismas estructuras complicadas que realizan, esencialmente, idénticas funciones. Entre estas estructuras se encuentran los orgánulos celulares conocidos por microtúbulos: largos y delicados tubos que, a veces en forma de varillas rígidas y otras como cuerdas relativamente flexibles, mantienen y cambian la forma de la célula o de alguno de sus componentes, impulsan material a través de la misma y separan la dotación duplicada de cromosomas en el transcurso de la división celular. Existen microtúbulos, en una u otra forma y, con frecuencia, en muchas, en todas las células eucariotas (nucleadas). Hace ya un siglo que se observaron y describieron muchas de estas formas, pero al conocimiento de su estructura y composición comunes –del microtúbulo como tal– se ha llegado tan sólo en las dos últimas décadas.

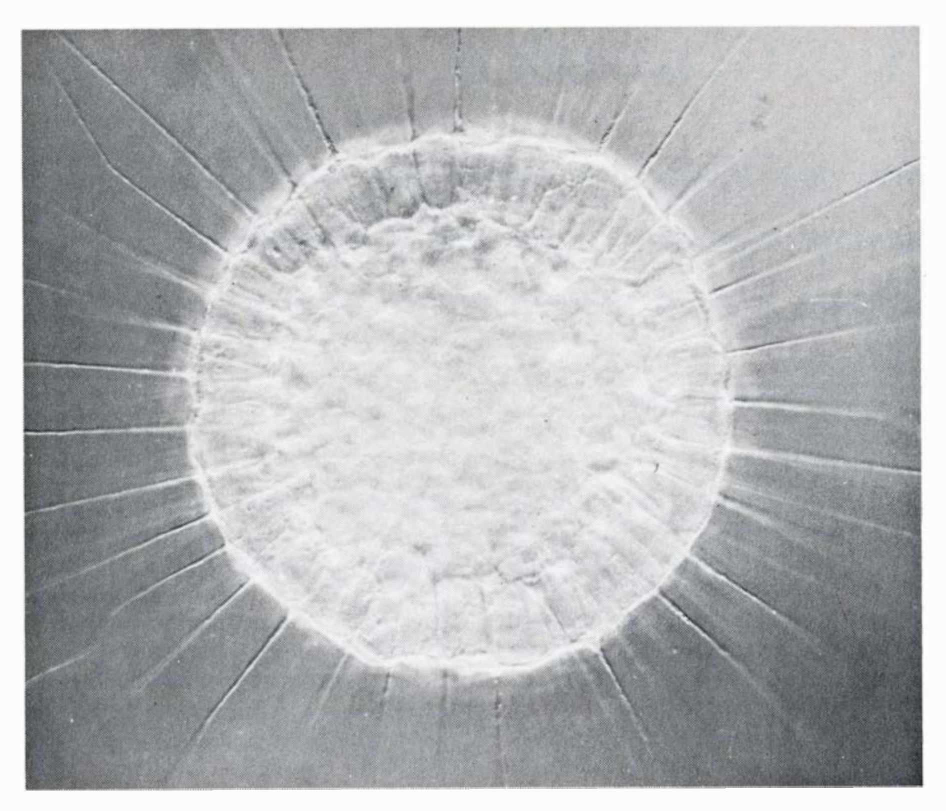
La investigación de los microtúbulos comenzó, aunque parezca extraño, con la gota. Esta dolorosa enfermedad resulta de un elevado nivel de ácido úrico en la sangre. Los glóbulos blancos sanguíneos engloban a los microcristales de urato y liberan los enzimas irritantes que contienen sus gránulos, provocando el penetrante dolor que caracteriza a un ataque agudo de gota. La droga más eficaz para mitigar el dolor (por razones todavía desconocidas) es la colchicina, alcaloide tóxico del cólquico (*Colchicum autumnale*), planta conocida desde hace siglos por su especificidad para los dolores de articulaciones. La colchicina fue purificada en 1883. Su conocida toxicidad condujo en Sicilia a un oscuro investigador, llamado B. Pernice, a estudiar su efecto en perros, señalando en 1889 que la droga causaba cambios sorprendentes en las zonas germinativas (es decir, regiones en las que las células se están normalmente dividiendo) del intestino: casi todas las células parecían estar en división. El informe de Pernice no tuvo repercusión hasta que fue redescubierto en 1949.



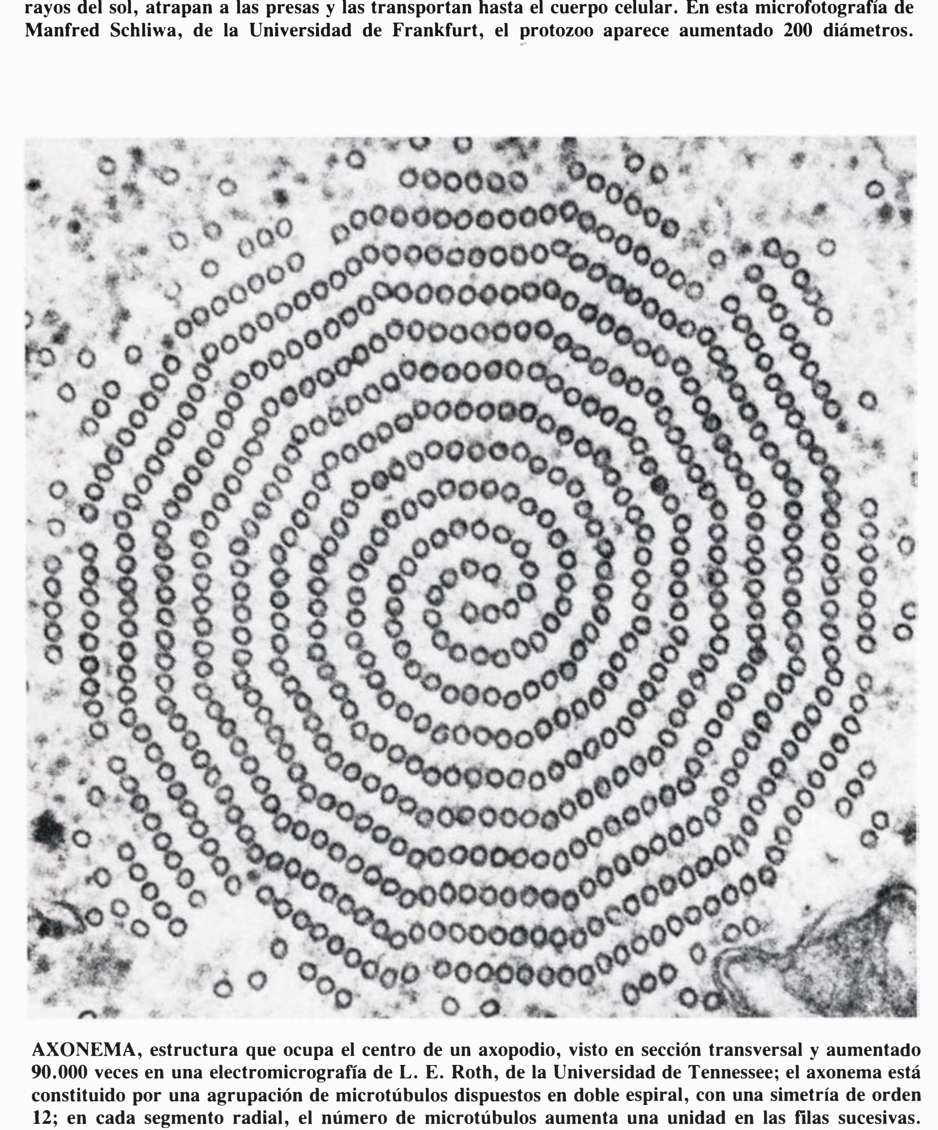
CONJUNTO DE MICROTUBULOS, que constituyen el armazón de la citofaringe de un protozoo, el ciliado *Pseudomicrothorax dubius*, vistos en corte transversal y aumentados unas 75.000 veces en una micrografía electrónica (*página opuesta*) tomada por Klaus Hausmann, de la Universidad de Heidelberg. La citofaringe (*dibujo izquierdo*) es una estructura aproximadamente tubular que se abre para ingerir algas u otras presas. La sección transversal completa de la citofaringe cerrada (*derecha*) muestra una estructura elíptica delimitada por haces aproximadamente triangulares de microtúbulos (22 en este caso) y con un mismo número de elementos lineales, que convergen hacia el interior. Cada haz periférico es un grupo de microtúbulos que se unen entre sí formando una estructura hexagonal; los elementos lineales son como láminas, compuestas por 25 microtúbulos cada una. Las estructuras redondas que aparecen entre ellos corresponden a mitocondrias, Ledbetter y Porter, en 1963, acuñaron el término microtúbulos.

Sin embargo, desde comienzos de este siglo, se sabía ya de varias informaciones acerca del aparente efecto estimulante que ejercía la colchicina sobre la división celular, informaciones que constituyeron el inicio de la moderna investigación. Esta comenzó en 1933 en la Universidad de Bruselas, en el laboratorio de mi padre, Albert P. Dustin, que había estudiado la regulación del crecimiento y de la división celular durante muchos años. Un joven estudiante de medicina, Franz Lits, sugirió que debía profundizarse en el efecto específico de la colchicina sobre la división celular. Lits encontró que la inyección de colchicina en ratones parecía provocar un gran incremento de la mitosis, o división celular, en todos los tejidos germinativos.

Pocos años más tarde, pudo explicarse este aparente aumento de la división. La colchicina no estimula la



AXOPODIOS del heliozoo *Actinosphaerium:* finas expansiones que se extienden desde la célula como los rayos del sol, atrapan a las presas y las transportan hasta el cuerpo celular. En esta microfotografía de Manfred Schliwa, de la Universidad de Frankfurt, el protozoo aparece aumentado 200 diámetros.



AXONEMA, estructura que ocupa el centro de un axopodio, visto en sección transversal y aumentado 90.000 veces en una electromicrografía de L. E. Roth, de la Universidad de Tennessee; el axonema está constituido por una agrupación de microtúbulos dispuestos en doble espiral, con una simetría de orden 12; en cada segmento radial, el número de microtúbulos aumenta una unidad en las filas sucesivas.

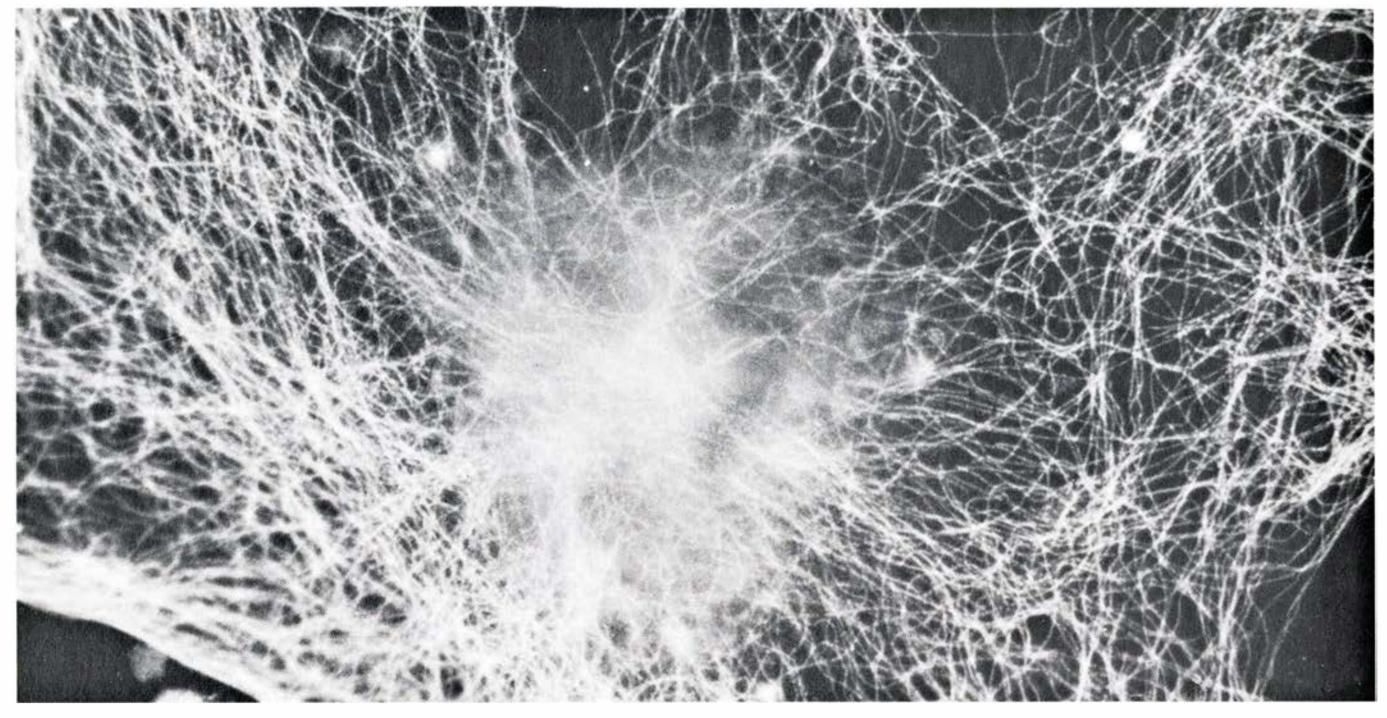
división celular; de hecho, la detiene: la droga interrumpe la división de la célula en un período determinado, la prometafase, ya que destruye el aparato fibrilar (denominado huso, por su forma) que separa las dos series de cromosomas y prepara así la división de una célula en dos. Se observan muchas figuras mitóticas, no porque se haya estimulado la mitosis, sino porque se van acumulando las células detenidas en mitad de ella. En 1937 se observó el mismo efecto en las células vegetales, convirtiéndose la colchicina en un valioso instrumento para producir plantas con múltiples dotaciones de cromosomas y originar así plantas híbridas fértiles. En 1955, cuando el botánico norteamericano O. J. Eigsti y el autor publicaron una monografía sobre la colchicina, era evidente que el alcaloide constituía un inhibidor muy específico de la división celular. Supusimos entonces que la colchicina se uniría a algún componente determinado de las fibras del huso.

En la década de 1960, un equipo encabezado por Edwin W. Taylor, de la Universidad de Chicago, estudió la acción de la colchicina marcándola con tritio, isótopo radiactivo del hidrógeno. Taylor señaló en 1965 que la colchicina marcada se unía irreversiblemente a las células humanas en cultivo y que, a bajas concentraciones, detenía la mitosis sin producir otros efectos metabólicos; sugirió que la droga se uniría a un componente estructural del huso. En 1967, Gary G. Borisy y Taylor aislaron la proteína que se unía a la colchicina y observaron que era especialmente abundante, no en células en mitosis, sino en las células nerviosas del cerebro, que no se dividen; donde se encontraba la proteína, señalaron, había también unas estructuras conocidas como microtúbulos.

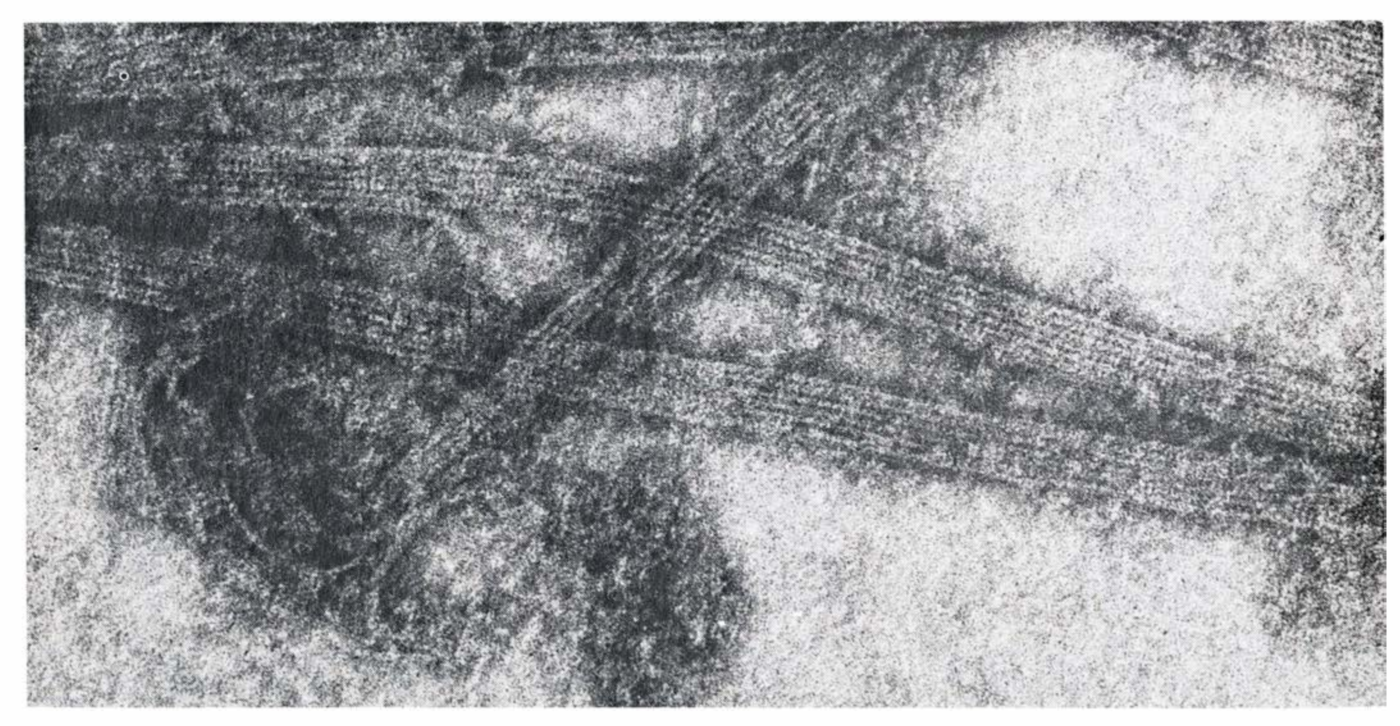
La denominación de microtúbulos, que data de 1963, se debe a Myron C. Ledbetter y Keith R. Porter, que trabajaban entonces en la Universidad de Harvard, y a David B. Slautterback, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Wisconsin. Por la fecha en que Porter resumió los conocimientos que se tenían de los microtúbulos, en 1966, se habían reconocido –en base a su estructura y ultraestructura aparentemente similar– en animales y plantas inferiores y superiores, en células nerviosas y células en división y, fundamentalmente, en dos apéndices móviles: los cilios (semejantes a pelos) de muchos tipos celulares y los flagelos (parecidos a colas) de células móviles como los espermatozoides. Borisy y Taylor sugirieron que el centro de

unión con la colchicina sería una subunidad de los microtúbulos, cuya similitud química y estructural debía demostrarse en las diferentes células.

En los años siguientes, muchos investigadores estudiaron las múltiples funciones de los microtúbulos en diversos tipos celulares. En mi laboratorio de la Universidad Libre de Bruselas, Étienne de Harven, que ahora se encuentra en el Sloan-Kettering Institute for Cancer Research, y el difunto Wilhelm Bernhard demostraron que las fibras del huso tenían forma de túbulo y que el centriolo, la estructura a partir de la cual se extienden esas fibras, era también una compleja asociación de microtúbulos. Otros investigadores del laboratorio probaron que los microtúbulos jugaban un papel esencial en la secreción de hormonas por la glándula tiroidea y el páncreas. Más recientemente, Jacqueline Flament-Durand y el autor han estudiado el efecto de la colchicina en el transporte de los gránulos de secreción en las



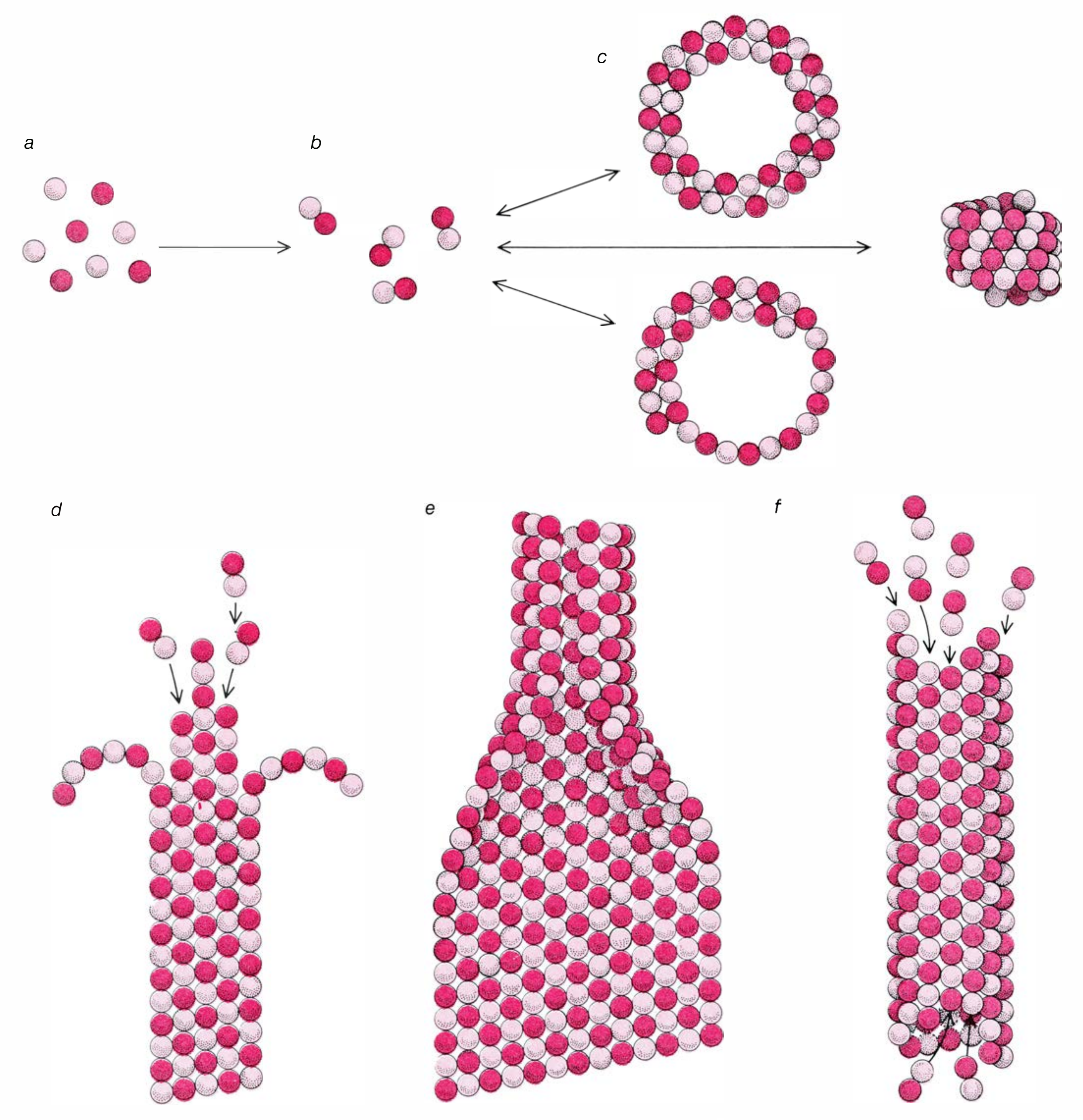
RED DE MICROTUBULOS que cruzan en todas direcciones a un fibroblasto (célula del tejido conjuntivo), visualizada por la técnica de inmunofluorescencia y aumentada unas 1500 veces en una fotomicrografía de Klaus Weber y Mary Osborn, del Instituto Max Planck de Fisicoquímica de Göttingen. La célula se incubó con anticuerpo de conejo frente a la tubulina, proteína que constituye los microtúbulos; dicho anticuerpo se unió a los microtúbulos. Seguidamente, se trató a su vez la preparación con anticuerpo de cabra frente a inmunoglobulina de conejo; el anticuerpo de cabra, que previamente había sido copulado con una sustancia fluorescente, se unió a la inmunoglobulina de conejo. Se fotografió con luz ultravioleta para registrar la fluorescencia.



MICROTUBULOS AISLADOS a partir de plaquetas sanguíneas, teñidos negativamente y aumentados unas 250.000 veces, según una micrografía electrónica de Olav Behnke y Tor Zelander, de la Universidad de Copenhague. En cada microtúbulo extendido se distinguen seis protofilamentos paralelos compuestos de subunidades de tubulina. Los protofilamentos tienden a separarse y curvarse en los extremos, como se observa a la izquierda.

expansiones nerviosas. La ubicuidad de los microtúbulos en las células eucariotas, así como su importancia para una gran variedad de funciones, han quedado ampliamente demostradas.

Cualquiera que sea su función concreta, tanto en plantas como en animales, los microtúbulos son, esencialmente, iguales: estructuras tubulares alargadas, cuyo diámetro total es de unos 24 nanómetros (un nanómetro es la millonésima parte de un milímetro), y con una luz central (como un agujero cilíndrico) de unos 15 nanómetros de diámetro. Su longitud varía de un caso a otro, pero casi siempre es mucho mayor que su anchura; con frecuencia miden muchos micrometros (milésimas de milímetro). Los microtúbulos se extienden a lo largo de los axones de las neuronas, que, en animales de gran tamaño, pueden medir varios metros de longitud, aunque dichos orgánulos no parecen ser continuos a lo largo de todo ese trayecto. Martin L. Chalfie y J. Nichol Thomson, del Medical Research Council Laboratory of Molecular Biology, de Cambridge, han señalado, en recientes observaciones de cortes seriados de nervios de un nemáto-



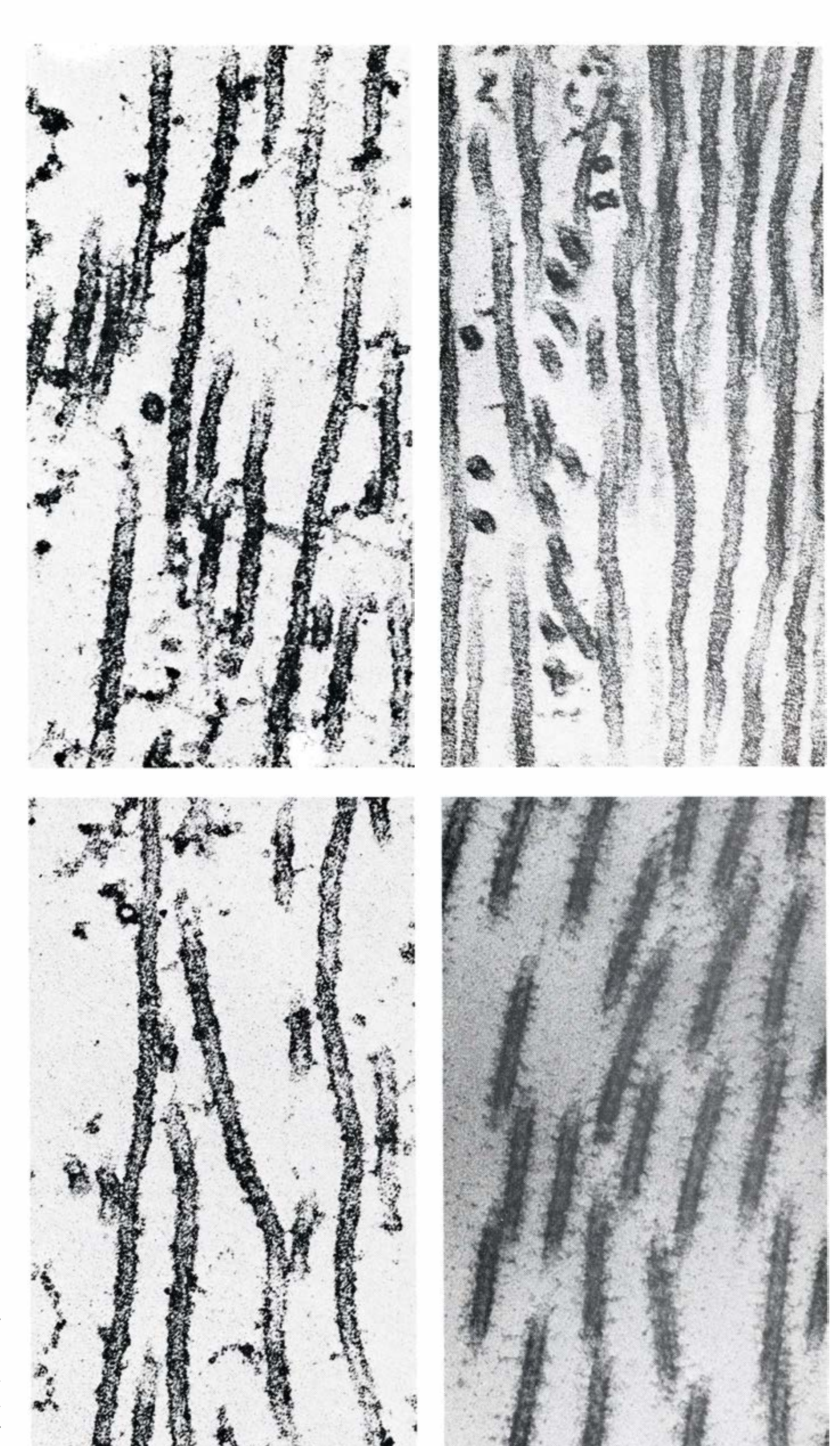
ENSAMBLAJE DE LOS MICROTUBULOS en el laboratorio. Comienza con dos moléculas proteicas, tubulina alfa y tubulina beta (*a*), que son moléculas globulares (quizá más ovaladas que estas esferas, sumamente esquemáticas). Las tubulinas forman dímeros, o dobles moléculas (*b*). Si la concentración de dímeros es suficientemente elevada, éstos se asocian formando diversas estructuras intermedias: anillos dobles, espirales y anillos apilados, entre otras (*c*); el equilibrio se desplaza, según las condiciones, hacia los dímeros aislados o hacia las estructuras intermedias. Los pasos siguientes no están bien establecidos. Parece ser que los anillos o las espirales se abren, originando hebras (denominadas protofilamentos) de dímeros asociados linealmente, que se unen lateralmente constituyendo una lámina (*d*); los extremos de los protofilamentos pueden curvarse. Cuando la lámina es suficientemente ancha, forma un tubo, tal vez replegándose (*e*). Una vez se ha formado un pequeño tubo (*f*), éste se alarga por adición de dímeros.

do, que la longitud de los microtúbulos oscila entre 10 y 25 micrometros.

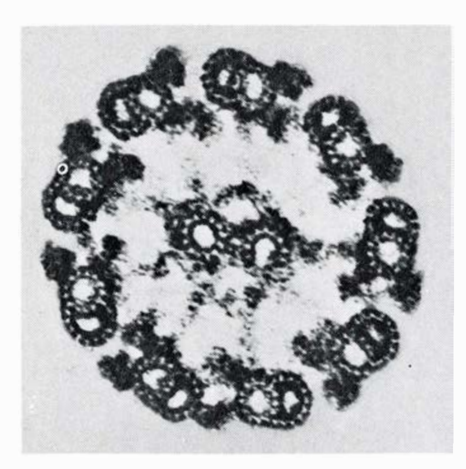
Al microscopio electrónico, los cortes transversales de microtúbulos aparecen como círculos. A grandes aumentos, se aprecia que el círculo está constituido a su vez por varias subunidades casi circulares. Tal como Porter había observado en 1966, casi siempre existen 13 subunidades, aunque puede haber algunas más, o menos. De la observación longitudinal de microtúbulos extendidos se deduce que están compuestos por "hebras" (generalmente en número de 13), denominadas protofilamentos, formada cada una de ellas por la agregación lineal de subunidades.

Las subunidades son dímeros, o moléculas dobles, compuestas por dos proteínas muy similares: las tubulinas alfa y beta. Cada una de ellas es una molécula globular –probablemente un esferoide achatado o un elipsoide– de un peso molecular de unos 55.000 dalton, aproximadamente. Cada molécula consta de unos 500 aminoácidos, de los que se han determinado la quinta parte; sus secuencias, notablemente similares, sugieren que ambas moléculas derivan de una proteína original común. Las tubulinas alfa y beta no sólo se parecen entre sí, sino que también son prácticamente idénticas en los diferentes organismos en que se han estudiado, lo que presume que las tubulinas han existido como tales desde que apareció en la tierra, aproximadamente hace unos mil millones de años, la primera célula eucariota.

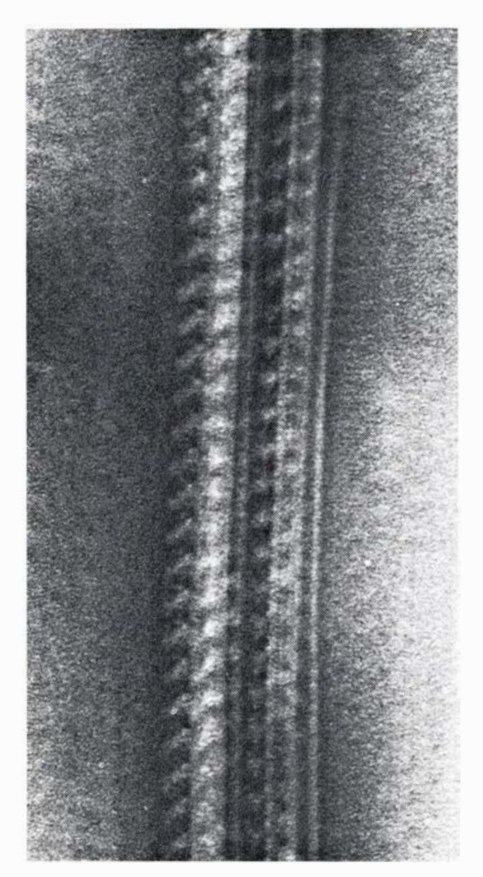
El proceso de ensamblaje de las subunidades de tubulina para formar microtúbulos se conoce parcialmente, sobre todo a partir de los experimentos de autoensamblaje de microtúbulos "in vitro" realizados por Richard C. Weisenberg en la Universidad de Temple, en 1972. Observó que, al incubar tubulina, purificada a partir de cerebro, a una concentración determinada, a un *p*H (acidez) concreto y en ausencia de iones calcio, tenía lugar un autoensamblaje de la tubulina, formándose largas estructuras muy parecidas a los microtúbulos celulares. Estudios posteriores han demostrado que, primero, se asocia una molécula de tubulina alfa con una molécula beta, formando un dímero cuyo aspecto semeja un ocho algo aplastado. Cada dímero tiene un centro de unión específico para la colchicina y otro para la vinblastina, droga que (como la colchicina) destruye los microtúbulos e impide, por tanto, la división celular (la vinblastina se muestra eficaz en la quimioterapia



CON SUBUNIDADES DE DIMEROS DE TUBULINA ensambladas, en diferentes condiciones, por Roger D. Sloboda y Joel L. Rosenbaum, en la Universidad de Yale (*arriba, abajo a la izquierda*), y por Helen Kim, Leser I. Binder y Ronsenbaum (*abajo derecha*) se obtuvieron estos microtúbulos, aumentados unas 100.000 veces en las micrografías electrónicas. Cuando los microtúbulos se ensamblaron en presencia de las denominadas proteínas asociadas a los microtúbulos (PAM), éstas aparecían revistiéndolos, como una pelusa (*arriba a la izquierda*). Los microtúbulos formados a partir de tubulina pura, en ausencia de PAM, tenían paredes lisas y se disponían más apretados (*arriba a la derecha*). Si se volvían a suspender estos microtúbulos en presencia de PAM, de nuevo reaparecería el recubrimiento (*abajo a la izquierda*). Finalmente, los microtúbulos constituidos a partir de tubulina y una de las proteínas asociadas, la PAM 2, poseían proyecciones separadas entre sí unos 30 nanómetros. La imagen se realizó copiando dos negativos duplicados, con objeto de reforzar la periodicidad de las proyecciones.



SECCION TRANSVERSAL de un cilio de erizo de mar contrastada con ácido tánico y aumentada 225.000 veces en una micrografía electrónica de Keigi Fujiwara, de la Facultad de Medicina de Harvard, y Lewis G. Tilney, de la Universidad de Pennsylvania. Existen dos microtúbulos centrales rodeados por nueve dobletes, cada uno de los cuales está compuesto por un microtúbulo completo (se aprecian sus 13 subunidades) y uno incompleto. Las estructuras están conectadas entre sí mediante diversas uniones, especialmente por dos brazos proteicos de dineína, que se extienden desde cada uno de los microtúbulos completos hacia el doblete vecino, y por nueve "radios".



DOBLETES ADYACENTES de un cilio del protozoo *Tetrahymena* visualizados con la técnica del contraste negativo, vistos en sección longitudinal y aumentados unas 190.000 veces en la electromicrografía de Fred D. Warner y David R. Mitchell, de la Universidad de Siracusa. Los cilios se disociaron en un medio con trifosfato de adenosina (ATP). En este estado "activo", los brazos de dineína (por medio de los cuales los dobletes se deslizan entre ellos) se observan como extensiones oblicuas periódicas. Este deslizamiento es la base de la flexión.

del cáncer; por el contrario, resulta la colchicina demasiado tóxica). El dímero tiene también centros de unión específicos para los nucleótidos difosfato y trifosfato de guanosina, que podrían suministrar energía para el proceso de ensamblaje.

No está todavía definitivamente establecida la secuencia de procesos que unen a los dímeros para constituir un microtúbulo; probablemente, dicha secuencia sea variable según las diferentes condiciones, tanto "in vitro" como en la célula viva. Parece existir un período de iniciación, que dura varios minutos, a lo largo del cual se observa, en las preparaciones de laboratorio, que los dímeros se unen por sus extremos formando anillos sencillos o dobles, espirales o pilas de anillos. Más tarde, se ven con frecuencia varios protofilamentos unidos lateralmente, constituyendo una lámina. El hecho de que al microscopio electrónico se observen a veces secciones transversales en forma de *C* (más que circulares) sugiere que la lámina puede curvarse y originar un tubo. En cualquier caso, la primera estructura similar a un microtúbulo que se descubre es, sistemáticamente, un corto túbulo a lo largo del cual se colocan los protofilamentos unos junto a otros, cuyas subunidades forman una estructura helicoidal constituida por 13 subunidades en cada vuelta. El tubo se alarga a medida que se adicionan al conjunto nuevos dímeros, preferentemente, aunque no exclusivamente, en un extremo.

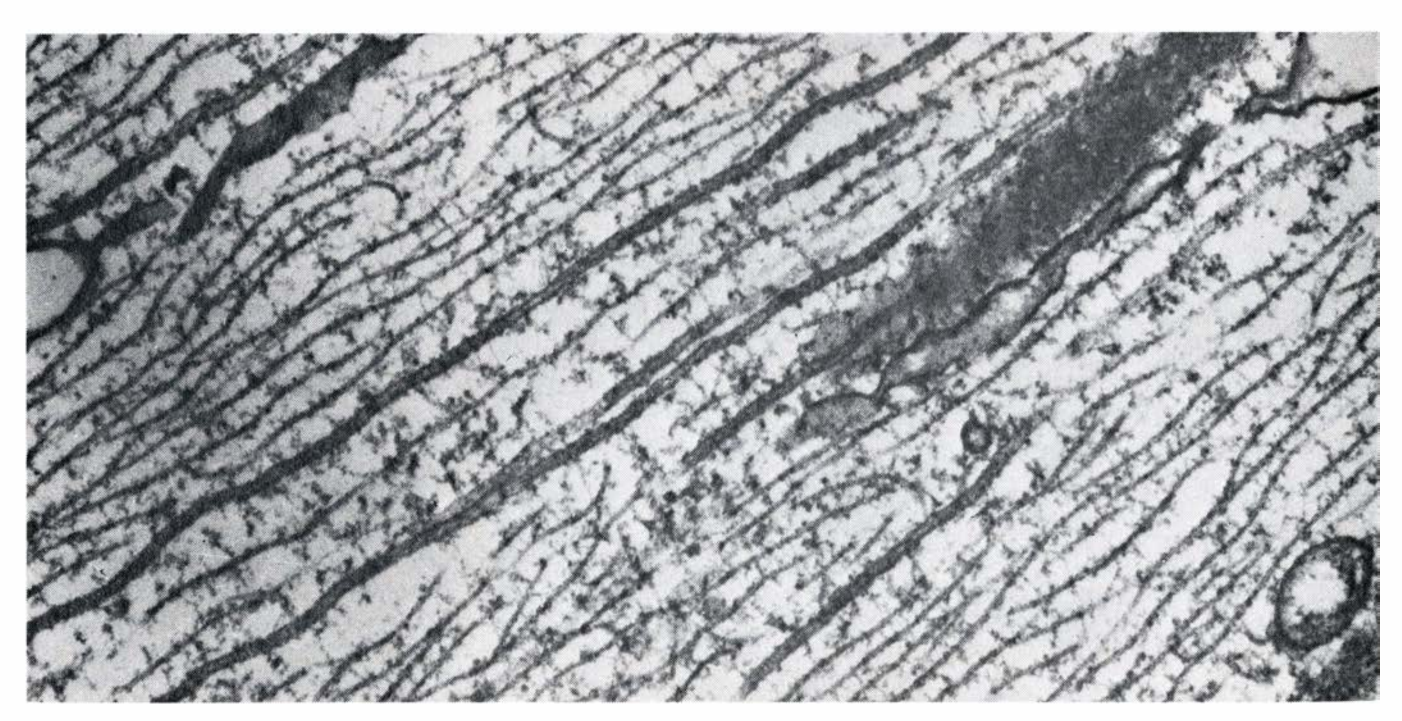
Cada dímero debe tener varias uniones diferentes, tanto longitudinales como laterales, con los otros dímeros. Algunas de ellas tal vez sean centros donde se puede unir la colchicina, pues el autoensamblaje de los túbulos no se realiza a partir de complejos de tubulina y colchicina. El papel del calcio es importante y bastan ligerísimos cambios en su concentración para afectar al proceso de ensamblaje. Algunos resultados recientes sugieren que la proteína reguladora dependiente de calcio, denominada calmodulina, controla el ensamblaje y la disgregación de los microtúbulos en las células en división.

A su vez, los microtúbulos se reúnen para formar diversas estructuras más complejas, que incluyen cilios y flagelos, corpúsculos basales y centriolos (cuyas funciones expondré más adelante). Los corpúsculos basales y los centriolos tienen una estructura idéntica. Están constituidos por nueve tripletes, cada uno de los cuales consta de un microtúbulo completo y dos en forma de *C*. Los corpúsculos basales (a partir de los cuales se forman los cilios) y los centriolos (que se encuentran, en muchas células, en el centro de los cuerpos polares, de donde se originan las fibras del huso) pertenecen a un grupo de estructuras conocidas como centros organizadores de microtúbulos y que parecen ser necesarias para el crecimiento de los microtúbulos. No siempre ofrecen una estructura definida, como los centriolos y corpúsculos basales: muchas veces se observan simplemente como cuerpos densos en el citoplasma celular o a lo largo de la membrana plasmática. Gran parte de la investigación actual se dirige a la comprensión de la bioquímica y del funcionamiento de estos centros organizadores.

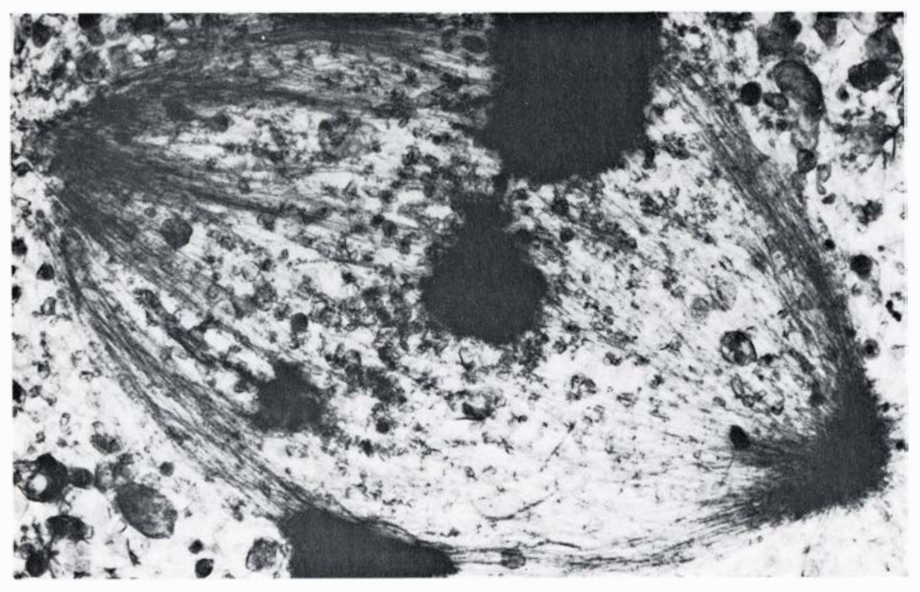
El estudio del ensamblaje de la tubulina condujo al descubrimiento de las proteínas asociadas a los microtúbulos, o PAM: diversas proteínas de gran tamaño (de un peso molecular aproximado de 200.000) y otra más pequeña, la proteína tau. Las PAM no son necesarias para el ensamblaje de los dímeros de tubulina, pero parecen facilitar el proceso, pues, en su presencia, los microtúbulos se constituyen antes y a una concentración de tubulina considerablemente inferior. Además, todo indica que las PAM protegen a los microtúbulos de algunos agentes (como la colchicina) y de determinadas condiciones (como bajas temperaturas o altas presiones) que tienden a disociarlos. Las PAM sobresalen de la superficie de los microtúbulos; recientemente se ha visto que por lo menos una de ellas, la PAM 2, se fija en dicha superficie a intervalos regulares. Estos brazos o salientes podrían participar en algún mecanismo de engranaje, mediante el cual los microtúbulos mantendrían la forma de la célula y producirían, asimismo, su movimiento.

Se ha dicho con frecuencia que los microtúbulos proporcionan un "esqueleto" a la célula. De ser cierto, nos hallamos ante un esqueleto muy inestable: los microtúbulos pueden disgregarse en cuestión de minutos, tras lo cual, las subunidades de tubulina a menudo se vuelven a reunir para formar otras estructuras completamente nuevas. En el citoplasma de las células existen otros tipos de fibrillas proteicas, entre las que se encuentran microfilamentos (constituidos fundamentalmente por la proteína contráctil actina) y varios tipos de filamentos "intermedios", más finos y mucho más estables que los microtúbulos. Parece probable que el mantenimiento y los cambios en la forma de casi todas las células sean consecuencia de una interacción entre

EL HAZ MARGINAL de microtúbulos es todo lo que queda (además de los restos celulares) de un glóbulo rojo sanguíneo del tritón *Triturus cristatus* tras ser tratado con un ácido biliar. Dicho haz, característico de los glóbulos rojos ovoides de los vertebrados no mamíferos, contribuye a mantener la forma elíptica de la célula, "ayudado" probablemente por proteínas que unen a los microtúbulos y los curvan. La estructura está aumentada unas 4500 veces en esta micrografía electrónica obtenida por Bruno Bertolini y Gianni Monaco, de Roma. Las plaquetas de los mamíferos tienen una estructura similar.



AXOPLASMA (protoplasma de un axón nervioso), aumentado 75.000 veces en una electromicrografía realizada por el autor en neuronas humanas. Las largas y prominentes estructuras tubulares (dos de las cuales parten del ángulo inferior izquierdo) son microtúbulos. Las fibrillas más delgadas corresponden a neurofilamentos; los cuerpos más grandes e irregulares son perfiles membranosos del retículo endoplásmico. Las proyecciones de la superficie de los microtúbulos (probablemente PAM) están tal vez conectadas con los neurofilamentos y con material que se transporta a lo largo del axón.



HUSO MITOTICO de una célula de mamífero en cultivo, visualizada en la metafase mitótica con un microscopio electrónico de alto voltaje. La micrografía electrónica fue tomada por J. Richard McIntosh, de la Universidad de Colorado en Boulder, y sus colegas. Los microtúbulos se extienden desde los cuerpos polares hasta los cromosomas (masas oscuras centrales), todavía sin escindir, y desde un polo al otro, constituyendo el huso en tonel, típico de los vertebrados. El aumento es de unos 11.000 diámetros.

diversos filamentos y los microtúbulos. El papel concreto de éstos no es tanto el de esqueleto cuanto el de andamiaje: un armazón que se ensambla y se disgrega rápidamente ejerciendo su efecto, no a través de la rigidez, sino mediante su capacidad de cambiar de forma. La relación entre la forma celular y los microtúbulos es patente en algunos elementos maduros de la sangre, en muchos organismos unicelulares y en las plantas superiores.

Los eritrocitos, o glóbulos rojos sanguíneos, de todos los vertebrados no mamíferos son nucleados y de forma biconvexa y oval. Mucho antes del descubrimiento de los microtúbulos se sabía que en estos eritrocitos nucleados había una banda proteica marginal a lo largo del perímetro elíptico de la célula, inmediatamente por debajo de la membrana plasmática. La banda marginal consta de un haz de microtúbulos, que deben estar unidos de un modo concreto ya que los microtúbulos libres tienden a ser rectos, confiriendo así rigidez y forma elíptica a la célula. Una estructura similar existe en las plaquetas sanguíneas de los mamíferos, que carecen de núcleo. En realidad, las plaquetas no son propiamente células, sino fragmentos citoplasmáticos de grandes células precursoras que se hallan en la médula ósea. Las plaquetas, que detienen las hemorragias y resultan esenciales para la coagulación de la sangre, son discos aplanados cuya forma se mantiene por la banda marginal; cuando la banda se desorganiza con colchicina o por baja temperatura, las plaquetas se hacen más o menos esféricas. Por otra parte, en los glóbulos rojos de mamíferos, que son discos bicóncavos carentes de núcleo, no existen microtúbulos (aunque sí los hay en las células nucleadas precursoras de los eritrocitos). Entre ellos existe una excepción: en los Camelidae (camellos y llamas), los glóbulos rojos son ovalados, aunque carentes de núcleo, y poseen un haz marginal de microtúbulos que parece ser indispensable para originar la forma oval de las células, aunque no para mantenerla, ya que se puede destruir dicho haz sin que la célula se deforme.

De los microtúbulos dependen la forma y, tal vez, el funcionamiento de muchas y complicadas estructuras que existen en los animales unicelulares (protozoos). Entre ellas están los axopodios radiales de los heliozoos, extensiones citoplasmáticas con las que atrapan a las presas y las conducen hacia el cuerpo celular. El centro del axopodio está ocupado por el axonema, haz de microtúbulos unidos por puentes proteicos cruzados y que a menudo se reúnen en forma de figuras singulares. Por ejemplo, en las secciones transversales del axopodio de *Actinosphaerium* se observa una disposición helicoidal doble, compuesta por centenares de microtúbulos, que presenta una simetría de orden 12. Se han descrito otros modelos, que también implican la existencia de uniones proteicas entre los microtúbulos. Los microtúbulos son lábiles; pueden desintegrarse en pocos minutos y reconstituirse en menos de una hora a partir de un acervo de tubulina citoplasmática. Cuando se desorganizan específicamente con colchicina, se regeneran rápidamente; todavía es un misterio cómo dirige la célula el proceso de ensamblaje.

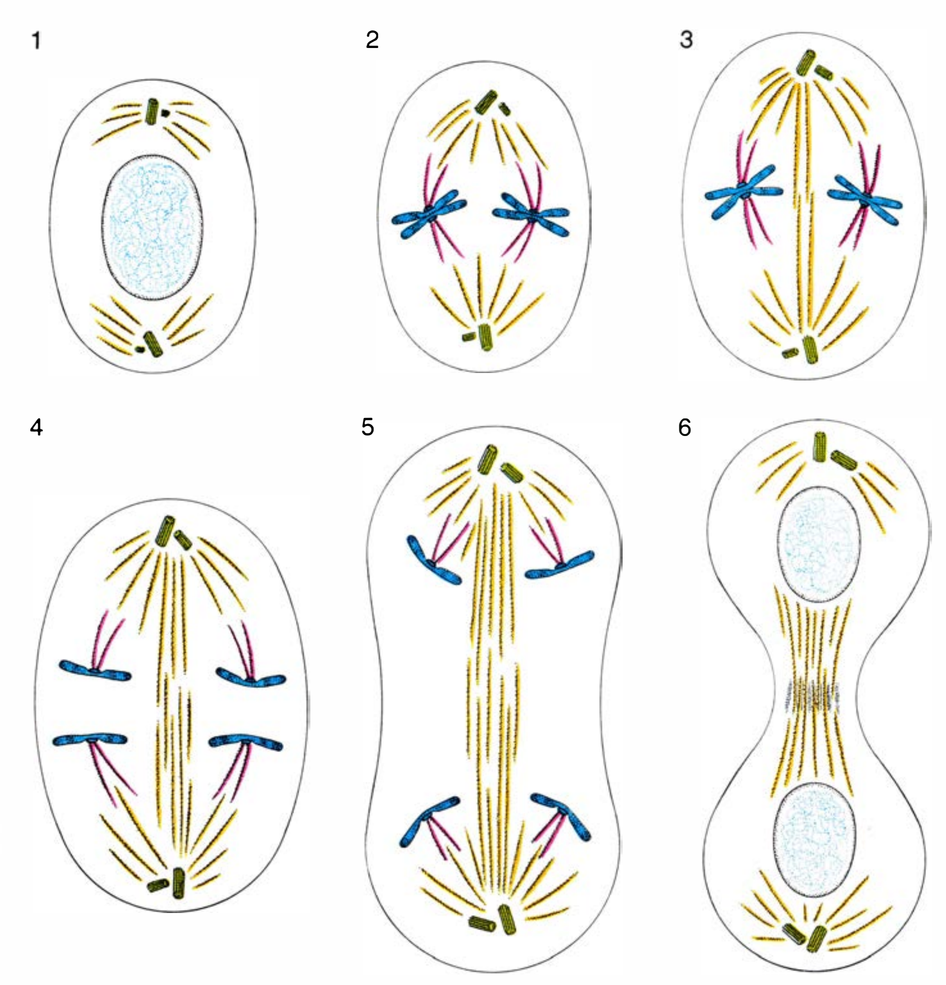
También se han observado modelos exquisitamente complejos en la citofaringe (orgánulo para la ingestión de alimento) de ciliados y en diversos tipos de tentáculos, así como en los cilios y los flagelos de protozoos. En todos ellos los microtúbulos tienen un claro papel de soporte: de varillas que dan forma a las expansiones de la célula o a orgánulos intracelulares. Además, su capacidad de disociación y



FORMA PRIMITIVA de división celular, que ocurre en la diatomea *Pinnularia major*. El eje de la división queda establecido por dos grupos interdigitados de microtúbulos, que se extienden uno hacia el otro, a partir de dos cuerpos polares semejantes a placas cóncavas; los dos grupos de microtúbulos se imbrican en el centro. Los cromosomas (*masas granulares oscuras*) se ven arrastrados, de alguna manera, hacia cada polo; se desconoce cómo están unidos a los microtúbulos. La micrografía electrónica fue obtenida por Jeremy D. Pickett-Heaps, de la Universidad de Colorado en Boulder, y sus colegas.

reasociación y el hecho de estar íntimamente unidos a proteínas contráctiles les permite experimentar deformaciones considerables e intervenir así en el movimiento de la célula y de partículas intracelulares.

El efecto de los microtúbulos sobre la forma celular es también patente en las células vegetales. En el transcurso de uno de los primeros experimentos sobre la acción de la colchicina, realizado en Bruselas en 1937, Laszlo Havas observó que la inhibición producida por ésta en el crecimiento de las puntas de raíz originaba en las raicillas unos bultos peculiares, a los que se denominó tumores *C*. Posteriormente se vio que los microtúbulos intervenían en la formación de la rígida pared fibrosa que poseen las células vegetales, controlando en ella la orientación de las fibras de celulosa. El plano por el que se dividirá una célula vegetal queda pronto indicado por una banda ecuatorial de microtúbulos situada inmediatamente por debajo de la membrana plasmática. Cuando la división es asimétrica (como, por ejemplo, en la formación de estomas en las hojas), la localización de los microtúbulos indica, ya desde antes, la asimetría. Los recientes trabajos de Brian E. S. Gunning, de la Universidad Nacional de Australia, y de Adrienne R. Hardham, de la Universidad de Carleton en Ottawa, demuestran que la localización de la banda ecuatorial está determinada genéticamente. Los microtúbulos representan, por tanto, un lazo visible de unión entre la actividad génica y la configuración de muchos y diversos tipos celulares de las plantas.



LA DIVISION CELULAR de las células que poseen centriolos se representa esquemáticamente en esta sucesión de dibujos. Al comienzo, cuando los cromosomas todavía no se han condensado y están rodeados por la membrana nuclear, los microtúbulos polares se extienden desde la región que rodea a los centriolos, en cada una de las cuales está comenzando a surgir un centriolo hijo (*1*). Mientras los microtúbulos polares se alargan, otros microtúbulos crecen a partir de los cinetocoros de los cromosomas, ya condensados, pero todavía sin escindir (*2, 3*). Los cromosomas comienzan entonces a separarse (*4*), se acortan los microtúbulos del cinetocoro y se alargan los polares. Los centriolos (ya dos en cada polo) parecen estirar de los cromosomas mientras los microtúbulos del cinetocoro se acortan; los microtúbulos polares pueden seguir alargándose (*5*). Cuando el ciclo cromosómico finaliza y se han formado ya los dos núcleos hijos (*6*), persiste todavía un haz de microtúbulos en la parte media de la célula, que está contraída por filamentos de actina (los cuales no se han representado). Diagrama de Patricia J. Wynne.

La integridad de los microtúbulos es un requisito para que se produzca el movimiento de las células que se desplazan esencialmente a base de cambiar repetidamente de forma, alargando y retrayendo su citoplasma a lo largo de un eje orientado en la dirección del movimiento (como, por ejemplo, los glóbulos blancos sanguíneos). Los microtúbulos parecen ser, en concreto, los responsables del movimiento orientado hacia un blanco (por ello, podría ser que la colchicina mitigue el dolor producido por la gota al reducir la capacidad de los glóbulos blancos sanguíneos de localizar y englobar a los cristales de urato).

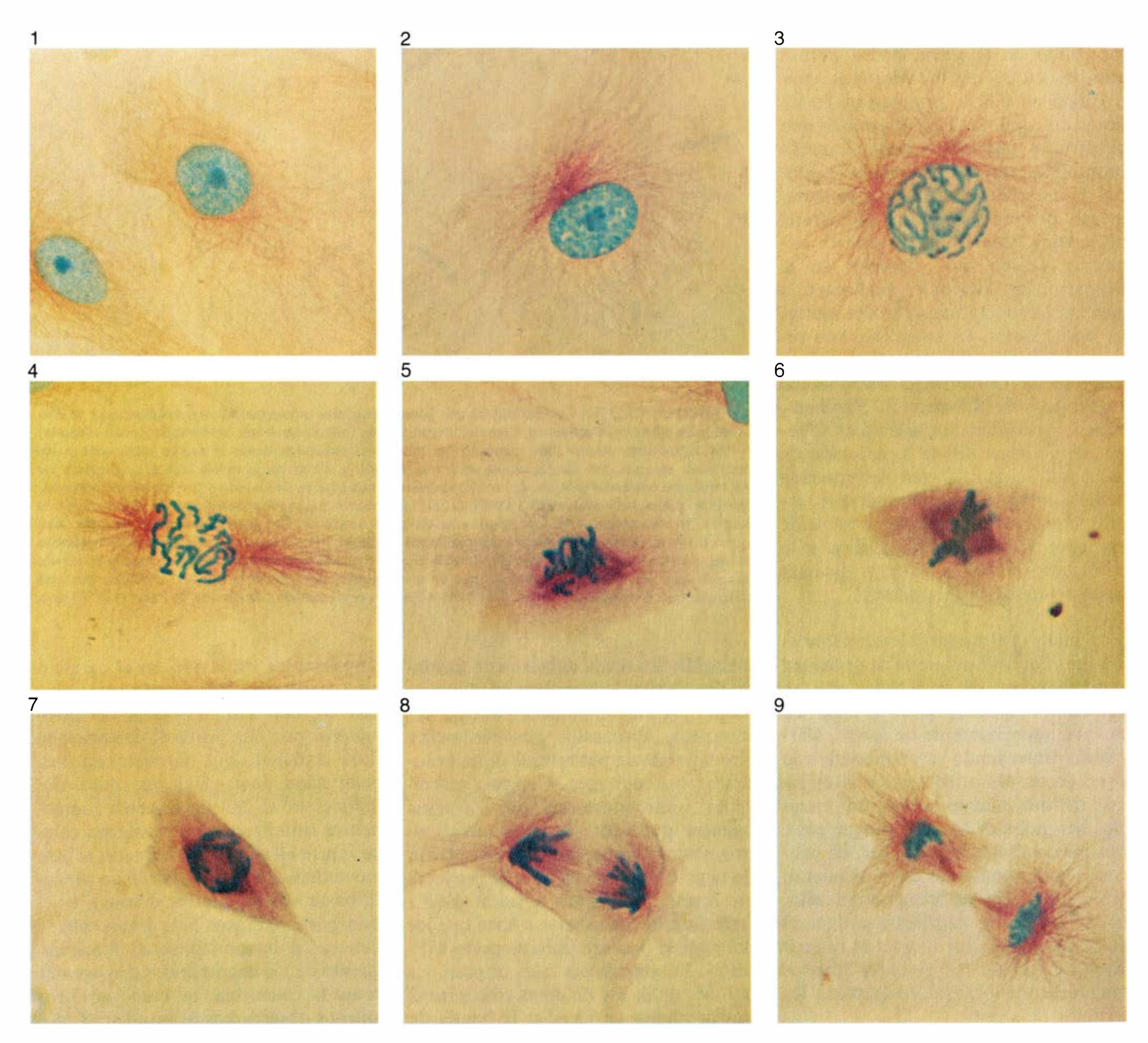
Es en los cilios y los flagelos donde la acción generadora de movimiento de los microtúbulos resulta más espectacular. En ambas estructuras móviles, un axonema queda rodeado por una extensión de la membrana plasmática. El axonema consta de nueve dobletes de microtúbulos (cada doblete está formado por un túbulo completo en el que se aloja longitudinalmente un túbulo incompleto) dispuestos simétricamente alrededor de un par central de microtúbulos. Los dobletes y el par central están interconectados por diversos puentes proteicos. El movimiento se origina como consecuencia de la acción de la proteína dineína, que se proyecta en forma de brazos a partir de la superficie de los túbulos y hace que los dobletes se deslicen unos respecto a los otros. La resistencia que ofrecen las uniones entre los dobletes convierte el deslizamiento en flexión: la batida de los cilios y la ondulación de los flagelos.

Un ejemplo de otra clase de movimiento asociado con los microtúbulos es el transporte hacia el cuerpo celular, a lo largo de los axopodios, de las partículas ingeridas por los protozoos: se trata del transporte intracelular, ampliamente estudiado en el axoplasma (citoplasma de los axones neuronales). Se dan aquí dos tipos de movimiento: por una parte el denominado flujo axónico, que consiste en una emigración lenta (tal vez sólo dos milímetros al día) de diversos componentes sintetizados en el cuerpo celular, entre ellos los microtúbulos; el otro movimiento, mucho más rápido (incluso hasta 400 milímetros diarios), es el transporte axónico. Este transporte se detiene al interrumpirse el funcionamiento de los microtúbulos con agentes como la colchicina, tal como nosotros mismos observamos al estudiar el movimiento de los grandes gránulos de neurosecreción de los axones que se extienden desde el hipotálamo, en el encéfalo, hasta la glándula pituitaria. La colchicina inhibía el transporte de los gránulos, pero los microtúbulos de los axones restaban manifiestamente

intactos. Quizá la explicación resida en que la droga interfiere en la unión de una proteína contráctil, como la actina, a la superficie de los microtúbulos. Un modelo actual acerca del mecanismo de transporte axónico supone que los microtúbulos sirven de vías, a lo largo de las cuales las partículas son arrastradas por alguna proteína contráctil [véase "Transporte de sustancias en las células nerviosas", por James H. Schwartz; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, junio].

Los "venenos" de los microtúbulos –como la colchicina– inhiben también el movimiento en el interior de las células secretoras y en los melanóforos (un tipo de células pigmentarias). Sus gránulos citoplasmáticos (que contienen hormonas o enzimas en las células secretoras y el pigmento melanina en los melanóforos) se transportan hacia la superficie celular para ser segregados al espacio extracelular y oscurecer la célula, respectivamente. Otra vez los microtúbulos parecen servir de guías y quizá las proteínas contráctiles que se unen a ellos sean la fuente de energía.

Tal como indicaron las primeras observaciones sobre los efectos de la colchicina, los microtúbulos son indispensables para la mitosis. Su destrucción conduce rápidamente a la detención del complejo minué de los cromosomas que precede a la división celular. Se sabe que las fibras del huso corresponden esencialmente a microtúbulos, que se constituyen en el momento adecuado del ciclo celular a partir de un acervo citoplasmático de subunidades. Sin embargo, incluso en un solo tipo celular, existen varios grupos de fibras en el huso, que pueden asociarse con proteínas contráctiles diferentes. Es más, tanto el proceso de división celular como la naturaleza de las estructuras que lo median pueden ser muy diferentes en los diversos organis-



MICROTUBULOS Y CROMOSOMAS teñidos diferencialmente en una serie de micrografías tomadas por Jan De Mey y Marc De Brabander, de la Janssen Pharmaceutica, en Bélgica; los microtúbulos (que aparecen en marrón) fueron teñidos con oro coloidal previamente unido a un anticuerpo contra la tubulina; los cromosomas se tiñeron con azul de toluidina. En la interfase, antes de que comience la división celular, existe una fina red de microtúbulos que se extiende por todo el citoplasma (*1*); los cromosomas todavía no se han condensado y se distingue el nucleolo. En la profase temprana (*2*) se aprecia un áster (rayos que rodean a lo que será un cuerpo polar). Durante la profase (*3*, *4*) se distinguen dos ásteres, que emigran hacia los polos opuestos de la célula mientras los cromosomas se condensan. En la prometafase (*5*), se constituyen las fibras del huso; en la metafase (*6*), los cromosomas se congregan en el ecuador de la célula y se unen a las fibras del huso que conducen a cuerpos polares opuestos. En la anafase (*7*), los cromosomas comienzan a separarse. En la anafase tardía (*8*), se separan, y en la telofase (*9*), están a pundo de formarse las dos células hijas.

mos. A pesar de tantos años de investigación, todavía queda mucho para llegar a comprender totalmente la mitosis y el papel que en ella desempeñan los microtúbulos.

Se sabe que, en la mayoría de las células, se requieren dos grupos diferentes de microtúbulos para el movimiento de los cromosomas. Un grupo surge desde una región especializada de cada cromosoma, el cinetocoro, hasta el cuerpo polar (que en las plantas primitivas y las células animales incluye un centriolo) de cada extremo del huso; el otro grupo se extiende de polo a polo. Las fibras unidas a los cinetocoros tienen un papel importante en la agrupación de los cromosomas en el plano ecuatorial de la célula durante los estadios iniciales de la mitosis. El movimiento subsiguiente de un conjunto de cromosomas hacia cada polo se realiza por el acortamiento de los microtúbulos a los que están unidos o por un deslizamiento entre dichos microtúbulos cromosómicos y los que se extienden de polo a polo. En muchas células, el mismo núcleo se alarga significativamente –a medida que lo hacen las fibras que van de polo a polo– contribuyendo a separar las dos series de cromosomas.

Los microtúbulos no se contraen: se acortan como resultado de la disociación de subunidades de tubulina en uno o en ambos extremos. Es difícil aceptar que los cromosomas se muevan como resultado de un proceso tan pasivo cual es la disgregación de una estructura unida a ellos, aun cuando su movimiento sea muy lento y requiera muy poca energía. En cambio, parece más probable que tenga lugar un mecanismo de deslizamiento, tal vez potenciado por proteínas del grupo de la actomiosina (responsables de la contracción muscular); de hecho, la existencia de dichas proteínas en el huso ha quedado demostrada por diversas técnicas. Es probable que también ocurra una disgregación de los microtúbulos, ya que se ha encontrado calmodulina (que parece controlar el ensamblaje y la disociación) en el huso de algunas células.

Además de los microtúbulos de las fibras del huso que he mencionado, en los últimos estadios de la división celular aparecen con frecuencia otras estructuras microtubulares. Cuando ya se han formado los dos núcleos hijos, e inmediatamente antes de que se separen las dos nuevas células, la única conexión entre ellas es un fino puente citoplasmático. Este consiste en dos grupos de microtúbulos interdigitados en sus extremos y embebidos en una matriz densa de composición desconocida. Estos microtúbulos podrían corresponder a los extremos de ambos grupos de fibras polares del huso, que se han deslizado uno sobre el otro y en este estadio se imbrican sólo en sus extremos.

Resumiendo los conocimientos de que se dispone actualmente sobre la mitosis, parece ser que los cambios de longitud de los microtúbulos alargan la célula y, también, separan los dos grupos de cromosomas. La fuerza requerida para estos movimientos, para el estrechamiento de la parte central de las células en división y para el estrangulamiento final del puente que conecta las dos células hijas proviene probablemente de microfilamentos y otras fibrillas formadas por proteínas del tipo de la actina y de la miosina.

Tal como corresponde a estructuras universales que poseen diversas funciones, los microtúbulos han sido estudiados exhaustivamente por investigadores interesados en muchos y diferentes aspectos de la biología celular. La atención actual se concentra, ampliamente, en tres campos. ¿Cuál es la naturaleza exacta de las proteínas asociadas a los microtúbulos, cómo se asocian aquéllas a las subunidades de tubulina y cuáles son sus funciones? ¿Qué distintas estructuras sirven de centros organizadores de microtúbulos, cómo se desarrollan y cómo originan los microtúbulos? ¿Cómo se explica la aparente polaridad de estos últimos, su marcada tendencia a ensamblar subunidades en un extremo y perderlas en el otro? Por otra parte, se está estudiando la genética de los microtúbulos y de sus proteínas asociadas en las levaduras, células eucariotas muy simples; se han identificado los genes que codifican la síntesis de tubulina y se está investigando su control. Considerando el extremo opuesto del árbol filogenético, la patología humana puede dar también información del funcionamiento de los microtúbulos. En la enfermedad conocida como síndrome de Kartagener se dan irregularidades en la dineína o en otras proteínas "puente" de los cilios; por otra parte, se han relacionado con los microtúbulos algunas estructuras fibrilares patológicas que se observan en las neuronas de pacientes psicóticos o de edades avanzadas. Por último, está sin resolver el problema de cómo contribuyen los factores de control –como el calcio– a dar forma a complejas estructuras tridimensionales, tan diferentes entre sí, como son el huso mitótico, los centriolos, el axonema de cilios y flagelos y el haz marginal de los glóbulos rojos sanguíneos.

Ciencia y sociedad

Entorno radiactivo

De la seguridad de los reactores de fisión nos ocupábamos en el número del mes de mayo. Hay otras fuentes de radiación que el gran público apenas conoce, pero cuya universalidad y falta de control resultan verdaderamente preocupantes. El hombre de la calle está expuesto a una radiación, cuyo promedio se cifra en 150 milirem por año, de fuentes cósmicas, terrestres, médicas y dentarias, cantidad que no incluye la dosis, mucho mayor, que inadvertidamente reciben millones de personas a partir de fuentes tan comunes como el tabaco y las dentaduras de porcelana.

Los cigarrillos nos exponen a una dosis anual equivalente a 8000 milirem por persona, debido a la acumulación de polonio 210 en las bifurcaciones de los bronquios pulmonares segmentados (suponiendo un consumo de 30 cigarrillos al día), y las prótesis dentarias que contienen porcelanas de uranio (en vez de productos acrílicos más modernos), a un promedio anual de hasta 60.000 milirem por persona. Otras fuentes de radiación sorprendentes son los relojes de pulsera de cuarzo líquido y las calculadoras de bolsillo que en ocasiones llegan a contener hasta 200 microcurie de tritio.

Es interesante comparar los valores de la exposición a radiación procedente del tabaco y las prótesis dentarias con la cantidad anual máxima sugerida por organismos competentes: 170 milirem por persona procedentes de todas las fuentes de radiación artificiales, aparte de las médicas y dentarias. Aunque es probable que los fumadores no dejen el tabaco por saber que se exponen a sí mismos a una radiación 47 veces mayor que la radiación máxima aconsejada, la presencia de polonio 210 en los cigarrillos es una razón más para habilitar departamentos para no fumadores en los lugares de reunión pública.

Más datos. La inmensa mayoría de las víctimas hipotéticas de un fallo en el control de un reactor de fusión no sufrirían una exposición radiactiva más grave que la que padecen hoy muchas personas a partir de la excesiva acumulación de productos de desintegración del radón, que se aprecia en las viviendas de medio y alto nivel. Para ser claros, en las viviendas que disponen de algunas comodidades (aire acondicionado, por ejemplo). El radón se libera a partir de la desintegración de cantidades traza de radio contenidas en los materiales de construcción y en el suelo. Su concentración aumenta en las viviendas dotadas de aire acondicionado, porque el aire calentado o enfriado se recicla, en vez de ser expulsado y renovado con aire fresco. (¡Cuánta razón tenían nuestras abuelas cuando decían que el aire fresco era bueno para la salud!)

Los sondeos de opinión pública en torno a los riesgos nucleares señalan el miedo generalizado de la gente ante el espectro de grandes accidentes catastróficos. Pues bien, la peor de las previsiones en caso de fallo resulta que no llega al riesgo de habitar, por menos de un año, ciertas viviendas bien equipadas. Riesgo que aumenta con la prolongación en el tiempo de ocupación de las mismas.

Satélite galileano

El descubrimiento de Neptuno en 1846 provocó una de las más floridas controversias sobre la prioridad científica. La existencia del planeta había sido deducida, y su posición calculada, por el matemático inglés John Couch Adams, pero ningún astrónomo se tomó la molestia de dirigir su telescopio hacia donde él indicaba. Mientras tanto, en Francia, Urbain Jean Joseph Leverrier, cuyos cálculos finalizaron algo después que los de Adams, logró persuadir a Johann Gottfried Galle, del Observatorio de Berlín, a llevar a cabo la búsqueda. Galle halló el planeta la primera noche de observación, y los honores de la predicción recayeron sobre el astrónomo francés Leverrier.

Se ha comprobado ahora que ni a Galle, ni a Adams ni a Leverrier les corresponde el derecho absoluto de prioridad. Neptuno había sido observado casi 55 años antes por Joseph Lalande, aunque éste no lograra identificarlo como planeta. Se dispone ya de pruebas convincentes de que Neptuno había sido observado por primera vez a principios de la historia de la astronomía telescópica. Fue apreciado, pero tampoco identificado correctamente, por Galileo Galilei sólo tres años después de que apuntara al cielo con un telescopio por primera vez, y 234 años antes de la obra de Galle. La observación de Galileo trasciende la pura curiosidad histórica. Pone en cuestión la precisión del cálculo de la órbita de Neptuno.

La primitiva observación galileana de Neptuno fue descubierta por Charles T. Kowal, del Instituto de Tecnología de California, y Stillman Drake, de la Universidad de Toronto. A Kowal le interesaba Neptuno porque su órbita no se conocía con tanta exactitud como la de los planetas interiores. Con un período de revolución de 165 años, Neptuno no ha cerrado aún una órbita completa desde que fue descubierto, lo que en parte podría explicar la incertidumbre teórica de su movimiento. La observación de Lalande, no obstante, fija la posición de Neptuno en 1795, y no coincide con el valor predicho. La discrepancia es sólo de siete segundos de arco, pero las observaciones astronómicas eran, a finales del siglo XVIII, bastante precisas, y la diferencia no puede sin más catalogarse de error de observación. Kowal esperaba hallar algún otro registro de alguna observación primitiva para evaluar mejor la precisión de la órbita calculada.

A partir de un artículo de Steven C. Albers, aparecido en la revista *Sky and Telescope,* Kowal supo que Júpiter ocultó a Neptuno en enero de 1613. Galileo había registrado metódicamente la posición de Júpiter y sus satélites desde 1610. Kowal se preguntaba si Galileo había descubierto Neptuno justo antes de la ocultación. En unión de Drake, Kowal estudió los registros diarios de Galileo. Descubrieron que el toscano había visto Neptuno la noche del 27 de diciembre de 1612, y, de nuevo, el 28 de enero del año siguiente. A pesar de su primitivo instrumental y sus sencillas técnicas de medición, Galileo logró determinar las posiciones relativas de Júpiter y Neptuno con bastante exactitud. El registro de sus observaciones deja poca duda de que Neptuno se hallaba más al oeste de lo que corresponde a su órbita teórica.

El 27 de diciembre Galileo hizo un diagrama de Júpiter y sus lunas y añadió la posición de otro objeto, que consideraba una estrella fija, pero que resultó ser Neptuno. Por aquel entonces, el movimiento aparente de Neptuno cambiaba de directo a retrógrado, de forma que el planeta estaba virtualmente estacionario respecto a las estrellas fijas. Algún interés especial debió de despertar en él Neptuno, pues raramente incluía estrellas fijas u otros objetos en los diagramas de las lunas de Júpiter.

El 28 de enero, Galileo descubrió una variación, respecto de la noche anterior, en la distancia entre Neptuno y una estrella fija próxima (designada

actualmente SAO 119234), pero no pudo afirmar cuál de los dos cuerpos se había desplazado. En otros casos, Galileo completaba un descubrimiento de esta índole con observaciones detalladas las noches siguientes. En este caso no lo hizo, y la razón es un misterio. En la actualidad sólo queda por justificar la noche siguiente, pues a partir del 29 de enero ya no podía tener a Júpiter, Neptuno y la SAO 119234, a la vez, en el campo de 15 minutos de arco de su telescopio. Sin un soporte graduado para el telescopio, y careciendo de un objeto brillante que le sirviera de referencia, es poco probable que pudiera localizar un planeta y una estrella fija invisibles a simple vista.

Sin embargo, el 29 de enero de 1613 Neptuno y SAO 119234 debían aún estar en el mismo campo que Júpiter. Quizá los planetas estaban demasiado próximos entre sí para que Galileo los distinguiera. La razón por la que no observó a Neptuno aquella noche podría aclararse con sólo calcular de un modo más preciso su órbita.

La discrepancia entre el registro galileano de la posición de Neptuno y la órbita teórica es de un minuto de arco. A partir de las observaciones de otros objetos y del conocimiento de la estructura de su telescopio, Kowal y Drake han concluido que la diferencia no puede atribuirse a un error de observación. Una explicación posible es que la órbita de Neptuno se hubiera visto perturbada por interacciones gravitacionales con un planeta aún no descubierto.

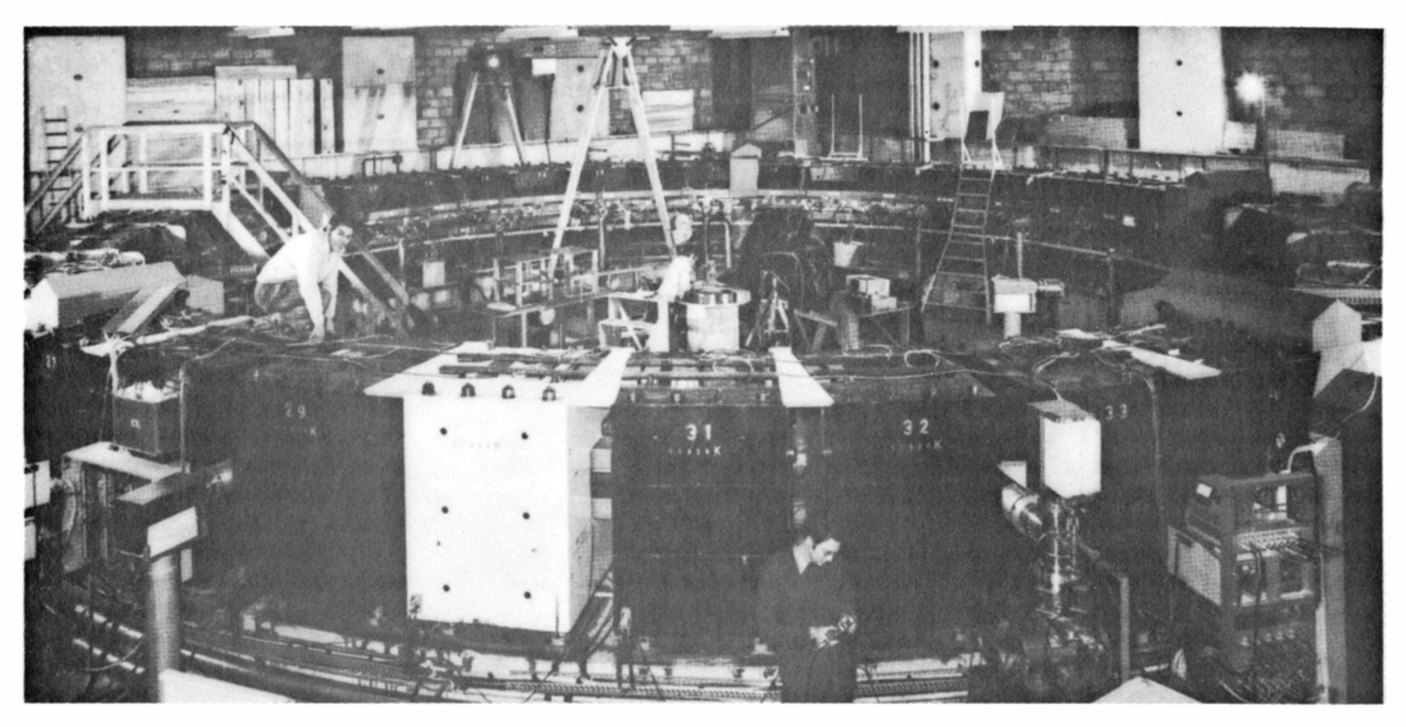
El descubrimiento de Neptuno, en el siglo XIX, fue posible gracias a una irregularidad orbital. Urano, descubierto en 1781, mostraba pequeñas desviaciones de su órbita predicha que no podían atribuirse a fuerzas gravitacionales de los planetas conocidos. Al analizar estos ligeros errores, Adams y Leverrier calcularon la posición aproximada de Neptuno.

El factor g del muon

El factor *g*, que relaciona el spin de una partícula elemental con su momento magnético, puede definirse para toda partícula con spin. El interés de su medición para los electrones se expone en este mismo número de INVESTIGACIÓN Y CIENCIA ("El electrón aislado", por Philip Ekstrom y David Wineland), en el que también se ha subrayado que la concordancia entre el valor medido y la predicción teórica constituye una de las mejores pruebas del poder predictivo de la electrodinámica cuántica. Pero ya en 1956 se hizo notar que la medida del factor *g* para el muon constituiría una prueba de la electrodinámica cuántica a distancias aún más pequeñas.

Recordemos que el muon es una partícula elemental de la clase denominada leptones (formada por el electrón, el muon, el recientemente descubierto leptón pesado tau y sus correspondientes neutrinos) registrada en 1937 en la radiación cósmica. Sus características son idénticas a las del electrón, excepto en su masa, que es unas 200 veces mayor, y en que es inestable, desintegrándose en un electrón y un par de neutrinos con una vida media de 2,2 microsegundos. Esta identidad de propiedades quedaría fuertemente confirmada mediante una medida precisa del factor *g* del muon.

Aunque el principio en que se basaría la medición del factor *g* del muon sería el mismo que en el caso del electrón, dicha medida presenta características y dificultades muy distintas. Estas derivan esencialmente de la inestabilidad de los muones, lo que implica desde un comienzo una incertidumbre en la frecuencia medida del orden del inverso de la vida media del muon. Sin embargo, desde que en 1957 se descubrió que los muones (obtenidos artifi-



Anillo de almacenamiento de muones utilizado en el tercer experimento realizado en el CERN para la medida del factor g *del muon. Dichos experimentos, llevados a cabo a lo largo de casi 20 años, constituyen uno de los experimentos más finos realizados jamás, y permiten una comprobación experimental muy precisa de algunas teorías y principios aceptados.*

cialmente a partir de la desintegración de los mesones pi) se creaban polarizados y que la distribución angular de los electrones en que se desintegraban permitía medir dicha polarización, se pensó en la posibilidad de una medida precisa del factor *g* del muon.

En 1958, un grupo de físicos del CERN (Organización Europea para la Investigación Nuclear) emprendió la medición del factor *g* del muon y, desde entonces, se han realizado en el CERN tres determinaciones experimentales, la última de las cuales finalizó en 1978. En estos casi 20 años, como en el caso de la medición del factor *g* del electrón, se han ido produciendo mejoras paralelas en las técnicas experimentales y en los métodos de cálculo, venciéndose obstáculos progresivamente mayores. De esta forma, el experimento del factor *g* del muon se encuentra entre los más precisos.

En el primer experimento realizado en el CERN, los muones provenían del sincrotrón de 600 MeV (millones de electronvolt) y se introducían en un campo magnético en el que permanecían unos microsegundos hasta su desintegración. En un intervalo tan corto de tiempo, establecido por la vida media de los muones, sólo se podían determinar dos ciclos de la frecuencia anómala, de manera que a pesar de los 936.000 sucesos registrados, sólo se pudo determinar el factor *g* con una precisión del 0,4 por ciento. La medida mostró un total acuerdo con los cálculos teóricos existentes, basados en la electrodinámica cuántica y en la universalidad electrón-muon, proporcionando entonces uno de los mejores tests de la teoría.

A fin de mejorar la precisión de la medida, convenía observar más ciclos de la frecuencia anómala, cosa que se podría lograr aumentando el campo magnético o dilatando la vida media de los muones. Si se utilizaban muones de gran velocidad, la teoría de la relatividad restringida aseguraba que la vida media aparecería más larga al observador en reposo. Se utilizaron muones procedentes del sincrotrón de protones del CERN que se almacenaban en un anillo de 5 metros de diámetro a velocidad tal que su vida media se dilataba hasta 27 microsegundos. La precisión que se alcanzaba en este segundo experimento, acabado en 1967 después de dos años de esfuerzos conjuntos de físicos del CERN, Daresbury y Mainz, fue de 270 partes por millón, apareciendo una ligera desviación respecto a los cálculos teóricos. Dicha desviación animó a los físicos teóricos a calcular nuevas contribuciones en el tercer orden del desarrollo perturbativo de la electrodinámica cuántica, que restablecieron el acuerdo entre observación y teoría.

El tercer experimento de la serie presentaba mejoras tanto en el grado de polarización de los muones, que pasó de 0,26 a 0,95, como en el aumento de la vida media, que se dilató hasta 64 microsegundos. El nuevo anillo de almacenamiento de los muones consistió en 40 imanes desviadores distribuidos en una circunferencia de 7 metros de radio. El dispositivo permitía, gracias a un conjunto de mejoras técnicas, una precisión mil veces mayor que el primer experimento de la serie. El valor obtenido allí para el factor *g* del muon es de 2,002331848 ± ± 0,000000017, cifra a comparar con la mejor predicción teórica existente de 2,002331842 ± 0,000000017. El acuerdo alcanzado constituye una excelente prueba de la electrodinámica cuántica.

Si bien la precisión alcanzada no es tan grande como en el caso del electrón, debido a las dificultades experimentales y a incertidumbres que se presentan en el cálculo teórico para el caso del muon a causa de su mayor masa, la ausencia de divergencias entre teoría y experimento permite asegurar que el valor del factor *g* del electrón seguirá coincidiendo con el valor predicho por la electrodinámica cuántica incluso en medidas de precisión tres mil veces mayor que la actual.

Mencionemos finalmente que al realizarse la medida tanto para muones de carga negativa como positiva independientemente, y al obtenerse igual valor, se comprueba también la bondad de algunas simetrías de las interacciones débiles con un elevado grado de precisión. El experimento constituye además la mejor comprobación experimental existente de la dilatación de los tiempos de la relatividad restringida a distancias del orden de las mil billonésimas de centímetro (Ramón Pascual).



PLACENTA HUMANA vista por el lado fetal en una fotografía realizada por Lennart Nilsson. El cordón umbilical está unido a la parte central; una red de vasos sanguíneos irradia hacia y desde el punto de anclaje. La membrana amniótica envuelve los vasos en el cordón umbilical (*abajo a la derecha*).

La placenta

Este extraordinario órgano actúa de intermediario entre dos organismos diferentes: el feto y la madre. Después del parto, puede utilizarse como "animal de experimentación" para la investigación de una gran variedad de cuestiones

Peter Beaconsfield, George Birdwood y Rebecca Beaconsfield

El desarrollo de un feto en el útero materno está ligado anatómica, genética y metabólicamente al de la placenta: un órgano peculiar de existencia transitoria y de forma aplanada que se encuentra adosado a la pared del útero. Se considera a veces la placenta como un simple sitio de fijación del cordón umbilical que, al igual que el tubo de conducción de aire de los buzos, transporta oxígeno al feto que se desarrolla en el líquido amniótico del útero. La importancia de la función del cordón umbilical fue apreciada desde muy antiguo, tal como demuestra la utilización que nuestros antepasados hicieron de su estructura para simbolizar el poder curativo e incluso la vida misma. Con sus paradójicas venas rojas dispuestas en espiral en un fondo de sustancia blanca, la representación del cordón aún se emplea como distintivo en las barberías; se trata de un símbolo antiguo transmitido por los barberos cirujanos medievales. La estaca de Esculapio, símbolo de la vida, rodeada por una serpiente, tiene probablemente un origen similar. A pesar de que sin la placenta el cordón no tiene nada que transportar y de que el feto no podría desarrollarse, la placenta ha merecido poca atención simbólica o de otro tipo.

El cordón umbilical transporta muchas otras sustancias además del oxígeno, y la placenta cumple funciones más relevantes que las de un simple anclaje del cordón. Abundantemente irrigada con sangre fetal por un lado y materna por otro, la placenta separa anatómicamente los sistemas circulatorios fetal y materno, de modo que todos los intercambios de sustancias ocurren a través de esta interfase. Durante su breve existencia, la placenta suministra todas las sustancias que el feto necesita y es la única vía para eliminar todas las sustancias de desecho producidas por el feto.

A fin de mantener y proteger la vida fetal hasta el momento en que el embrión está capacitado para una existencia independiente, el tejido placentario se comporta como un órgano trasplantado en el útero materno, donde es tolerado, adopta un crecimiento invasivo y adquiere una extraordinaria actividad metabólica. La placenta es un órgano único, en cuanto se diferencia y crece a partir de tejido embrionario hasta alcanzar la madurez (e incluso el envejecimiento) en un período de semanas o meses, según las especies. Además, la placenta puede seguir desarrollándose en el útero después que el feto ha muerto o ha sido eliminado, e incluso puede implantarse en otros tejidos maternos y nutrir al feto hasta la madurez sin la protección del útero. En resumen, la placenta muestra una primacía biológica que refleja su papel indispensable en la perpetuación de las especies.

Falta mucho por conocer sobre el funcionamiento de la placenta, pero en los últimos años resulta evidente que la placenta, más que como un filtro pasivo, actúa de forma activa y selectiva en la transferencia de sustancias, siendo esencial para el desarrollo del feto. Poseyendo un metabolismo propio, la placenta es capaz de modificar moléculas de procedencia materna, fetal o externas. Se trata de un microcosmos biológico, un sistema equivalente a múltiples órganos que desarrolla funciones nutritivas, respiratorias, renales, hepáticas y endocrinas para el feto y en colaboración con él durante los distintos estadios de su desarrollo intrauterino. Además, la placenta puede regular muchas funciones maternas sintetizando múltiples hormonas idénticas a las producidas por la hipófisis.

En todo caso, la placenta debe dar prioridad a sus propias necesidades como prerrequisito para satisfacer las del feto y, además, a diferencia de los parásitos que destruyen al organismo en que viven, la placenta tiene que desarrollar sus actividades metabólicas sin afectar la salud materna. Tanto la estructura como la función de la placenta están dirigidas a promover el crecimiento, por una parte, y a mantener el equilibrio entre los sistemas fetal y materno, por otra. Entre las complejas actividades fisiológicas necesarias para cumplir tales funciones, algunas presentan un interés científico especial. Entre ellas, el control de la diferenciación y replicación celular durante el crecimiento invasivo de la placenta en el útero materno, semejante al crecimiento de un tumor; el sistema endocrino placentario que controla innumerables aspectos del embarazo tanto en la madre como en el feto (una liberación continua de mensajes químicos que culminan en la iniciación del parto); los procesos inmunológicos que protegen a la placenta y al feto del rechazo y que dotan al recién nacido de anticuerpos protectores; y, finalmente, la maduración de la placenta.

A continuación consideraremos sucesivamente cada uno de los citados aspectos de la función placentaria. Además, pondremos de manifiesto el interés de la placenta como modelo de investigación de temas tan diversos como el código genético, el crecimiento normal, el cáncer, el trasplante de órganos, el efecto de distintas drogas e, incluso, el envejecimiento. Primeramente consideraremos, no obstante, la forma en que la placenta y el feto se desarrollan.

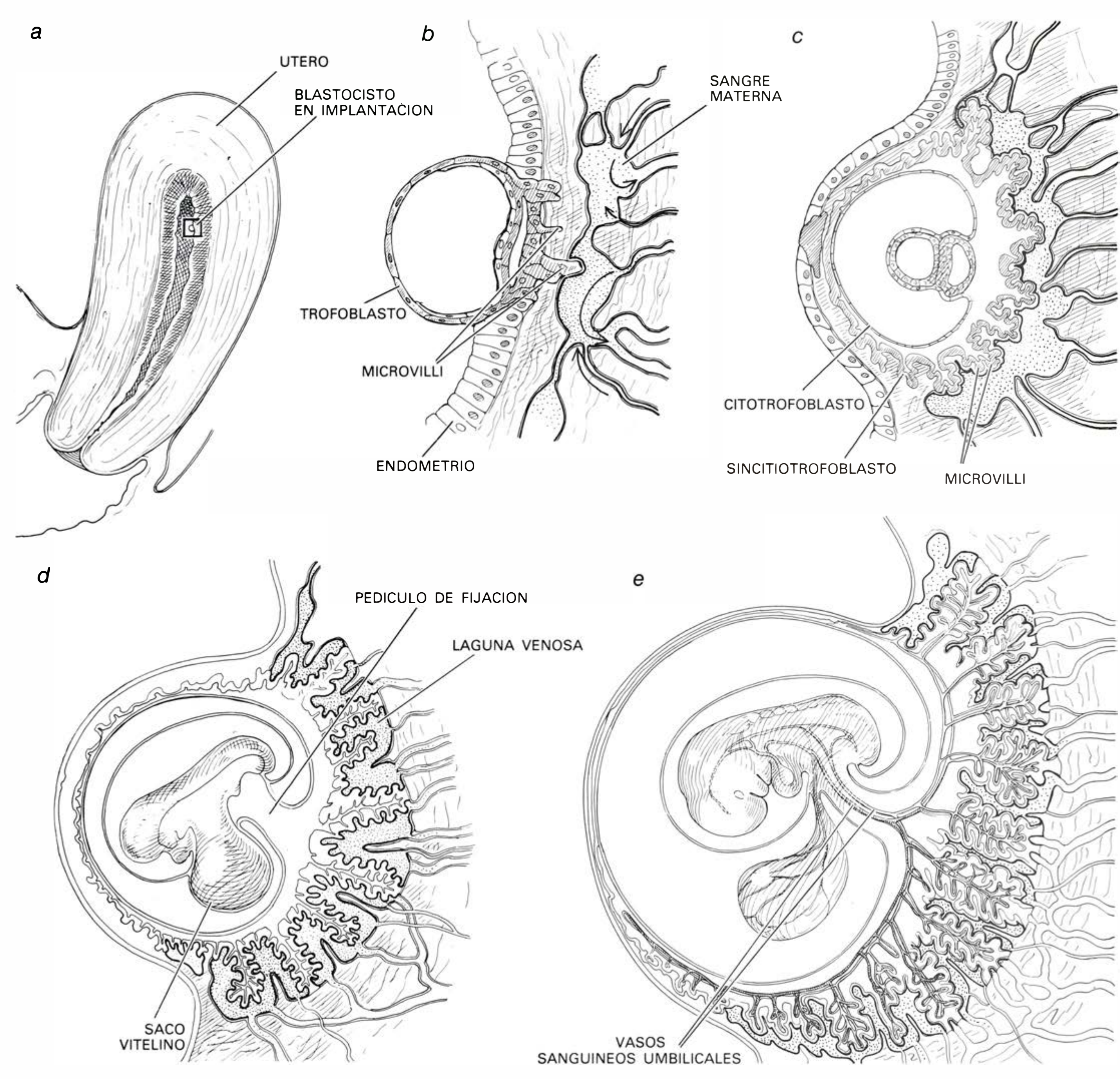
Origen

No se considera habitualmente que la placenta y el feto proceden de la misma célula: el óvulo fecundado. De ahí que la sangre que fluye a través de la placenta y del cordón umbilical sea de origen fetal o, más exactamente, embrionario. Ello significa que el hue-

vo fecundado debe estar genéticamente programado para satisfacer sus necesidades presentes y futuras. En efecto, hasta que el huevo completa su recorrido desde el extremo superior de la trompa de Falopio de la madre, donde es fecundado habitualmente, hasta el útero, donde se implanta en la pared, recibe sorprendentemente poca ayuda materna. ¿Cómo se desarrollan la estructura y función particulares de la placenta? En general, el desarrollo depende de la misma información genética que controla el crecimiento del feto.

Poco después de que el óvulo es penetrado por el espermatozoide, las dos células se fusionan formando una célula única, el cigoto, que contiene información genética de ambos padres. En pocas horas el cigoto, obedeciendo su propia información genética, empieza a dividirse: la célula única da lugar a dos células, éstas originan cuatro, y así sucesivamente. El huevo fecundado ha iniciado su crecimiento, pero hasta este momento la madre no puede decirse embarazada, es decir, no proporciona un soporte especial al desarrollo del huevo. Este requiere únicamente, para dividirse, el ambiente líquido que lo rodea.

La progesterona, uno de los dos tipos principales de hormona esteroidea sexual femenina, transforma el endometrio, la capa que recubre el útero, en un lecho vascular esponjoso adecuado para la nutrición del huevo fecundado. La fase de elevada produc-

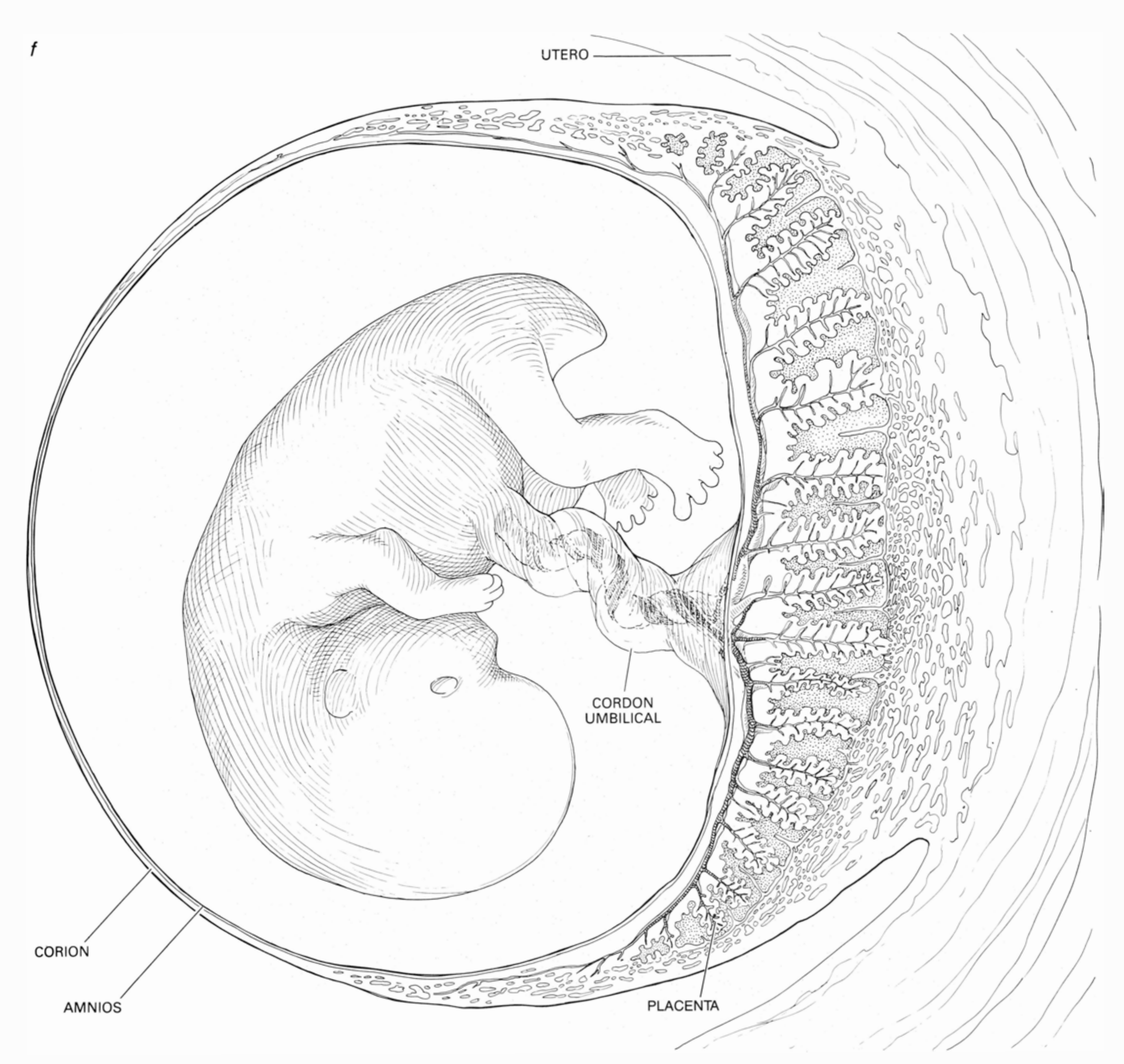


DESARROLLO DE LA PLACENTA HUMANA representado en la secuencia de esquemas de estas dos páginas. La secuencia se inicia con la implantación del blastocisto en la pared del útero (*a*). Cuando la parte del blastocisto que contiene la masa celular interna establece contacto con el endometrio, capa que recubre el útero, el trofoblasto (la capa celular que dará lugar a la placenta) empieza a formar unas pequeñas proyecciones digitiformes denominadas microvilli, que se extienden hacia la cubierta endometrial (*b*). A medida que la invasión prosigue, el trofoblasto se diferencia en dos capas, la externa o sincitiotrofoblasto, que encabeza el avance hacia el endometrio, y el citotrofoblasto, que forma un complejo sistema de proyecciones que penetrarán, a través del sincitiotrofoblasto, en las lagunas de sangre materna formadas en el camino de las células invasoras;

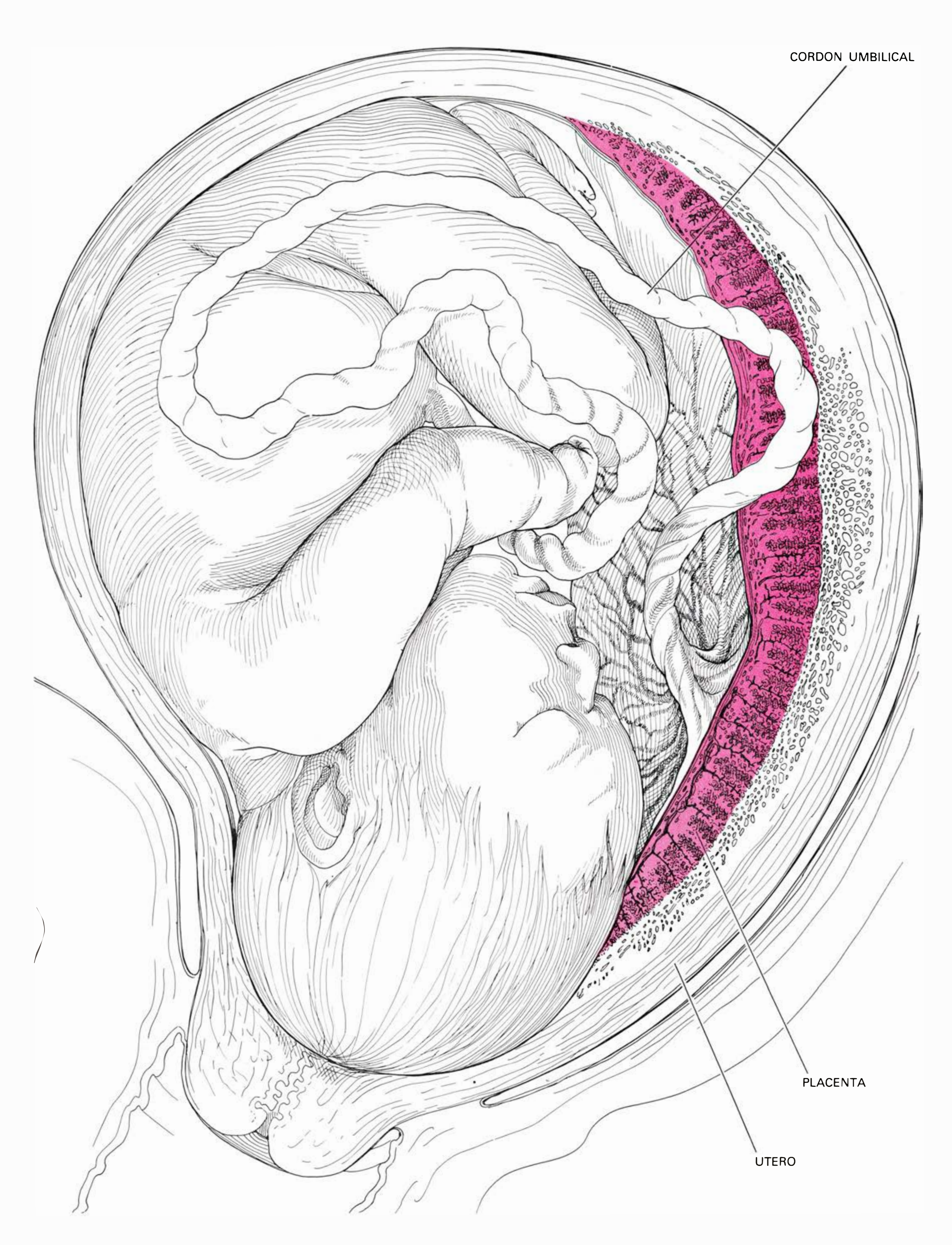
ción de progesterona que sigue a la ovulación en cada ciclo menstrual no sólo facilita la división celular en el embrión, mientras se desplaza por la trompa de Falopio, sino que prepara el útero para su implantación. Tales condiciones, como es sabido, pueden reproducirse sin mucha dificultad en el laboratorio para producir "niños probeta" o, más exactamente, embriones probeta, que sobreviven en medio de cultivo algunos días antes de su implantación en un útero dispuesto.

En un medio adecuado, pues, las células embrionarias se dividen simplemente como resultado de la fecundación y formación del cigoto. En ningún organismo vivo, vegetal o animal, con excepción de las células cancerosas, existen células que se dividan de tal forma por propia iniciativa. Habitualmente requieren el estímulo procedente del tejido y se dividen para cumplir una función de reemplazamiento o regeneración. La división se inicia con la replicación del ADN en el cigoto, seguida de inmediato por la síntesis de ARN. Los enzimas necesarios para la síntesis inicial de ácidos nucleicos deben estar presentes en el óvulo antes de la fecundación, pero una vez la división celular se ha iniciado y, desde luego, en el estadio de dos células, todos los mecanismos necesarios para el metabolismo celular y la replicación están ya presentes en el cigoto.

De forma similar, las proteínas sintetizadas en las primeras horas después de la fecundación lo son a partir del



muy pronto el blastocisto quedará completamente enterrado en el tejido endometrial (*c*). Durante la fase de invasión, el trofoblasto y el feto en desarrollo están conectados por el pedículo de fijación, una estructura que en estadio ulterior del desarrollo dará lugar al cordón umbilical (*d*). Alrededor de la quinta semana del embarazo, las proyecciones ramificadas del citotrofoblasto son penetradas por vasos sanguíneos fetales originados en las arterias del cordón umbilical (*e*). El citotrofoblasto se extiende lateralmente durante este período y finalmente se une a otras membranas embrionarias para formar el caparazón más externo conocido como corion; la diferenciación final del trofoblasto para constituir la placenta da lugar a las membranas deciduales internas, que engloban el líquido amniótico en el que se desarrollará el feto (*f*). La placenta actúa como un órgano trasplantado en el útero.



PLACENTA A TERMINO, una estructura discoidal que mide alrededor de 20 centímetros de diámetro y 3 centímetros de grosor en su parte central. La superficie materna está dividida en múltiples lóbulos; la superficie fetal es vascular y lisa. En promedio, la placenta pesa, en el momento del nacimiento, unos 500 gramos, es decir un sexto del peso del recién nacido al que ha nutrido. En la página 60 se muestra una sección de la placenta a mayor aumento.

ARN materno presente en el ovocito (el precursor del óvulo), pero con la formación del ARN propio del embrión en los primeros estadios comienza la síntesis de proteínas embrionarias. Efectivamente, con las primeras divisiones celulares, la síntesis de todos los tipos de ARN embrionario aumenta rápidamente a medida que la diferenciación de las células embrionarias progresa, acelerándose enormemente la síntesis proteica. En la fase final del estadio de ocho células, existen más de 1000 proteínas distintas en el embrión. A partir de ese momento, aumenta en cada división celular la cantidad de proteínas, pero no su variedad. Todos estos fenómenos ocurren en el óvulo fecundado de la misma manera que ocurrirían si el huevo estuviera rodeado de una cáscara. La madre, biológicamente al margen del fenómeno, no proporciona más ayuda que la que daría simplemente incubando un huevo.

El blastocisto

El grupo de células embrionarias en división alcanza el útero cuatro días después de la fecundación, cuando se han iniciado cambios que culminarán en la creación del blastocisto, una pelota de células prácticamente hueca que es el precursor del embrión. Las distintas células de la masa celular están menos definidas y muestran un aspecto menos similar, empezando a diferenciarse la arquitectura externa e interna. A medida que continúan las divisiones celulares, se establecen uniones membranosas entre células adyacentes de la capa más externa hasta formar una coraza protectora unicelular con el aspecto de un balón de fútbol. Esta capa puede considerarse como el primer estadio del desarrollo del trofoblasto, la capa celular que dará lugar a los principales elementos estructurales de la placenta. Cinco días después de la fecundación, cuando el blastocisto humano consta de unas 120 células, puede distinguirse un grupo celular en un extremo de la cavidad llena de líquido formada por el trofoblasto. Este grupo, conocido por masa celular interna, dará lugar al feto.

Hasta ese momento, el embrión en desarrollo aún flota libremente sin placenta y sin que existan funciones maternas especializadas dirigidas a su nutrición o a la estimulación hormonal de las divisiones celulares. Una vez el blastocisto se encuentra en el útero, se ponen en marcha rápidamente los mecanismos para su implantación en la pared uterina. El objetivo se logra en el sexto o séptimo día después de la fecundación, con toda probabilidad gracias a la síntesis de estrógenos, otro tipo importante de hormonas esteroideas sexuales femeninas. La producción de los estrógenos no sólo facilita la implantación del blastocisto mediante cambios locales de la permeabilidad del endometrio de la pared uterina, sino que libera, a partir de esta capa, un mensajero químico, una prostaglandina que aparentemente sirve para poner en estado de alerta el sistema endocrino de la madre.

Las células preplacentarias del trofoblasto realizan estas funciones iniciando el embarazo a través de una serie de cambios hormonales específicos en la glándula pituitaria y el cuerpo lúteo materno; esta estructura endocrina transitoria se desarrolla cuando el ovario libera el óvulo para su posible fecundación. Los cambios hormonales tienen por objeto conseguir la nutrición del embrión. El cuerpo lúteo produce las grandes cantidades de progesterona requeridas en el ciclo menstrual normal para preparar el endometrio en la recepción del óvulo fecundado. Durante el embarazo, el órgano continúa sintetizando la hormona más allá del período en el que ocurriría la menstruación, por lo que el endometrio seguirá proporcionando un ambiente adecuado para el blastocisto.

Implantación

La implantación del blastocisto, o preembrión, en la pared del útero es un importante proceso en el que el trofoblasto establece un íntimo contacto con el endometrio materno. Aunque la implantación es un proceso continuo, se describe habitualmente como si tuviera lugar en tres fases: aposición, adhesión e invasión. En la fase de aposición del blastocisto humano, la masa celular interna establece contacto con el endometrio. Las células del trofoblasto mandan, desde su superficie externa, proyecciones en forma de dedos denominadas microvilli, que establecen interdigitaciones con las microestructuras correspondientes del endometrio, dejando espacios no mayores de 250 unidades angstrom. De esa forma, casi establecen contacto el trofoblasto y la capa endometrial del útero. Durante la fase de adhesión, el espacio entre las dos estructuras se hace aún más estrecho, y luego los microvilli de la superficie del trofoblasto comienzan la regresión. En la fase de invasión que sigue, el blastocisto queda completamente enterrado en el tejido endometrial.

En los primeros estadios de la invasión, el trofoblasto empieza a diferenciarse en dos capas celulares: la externa, sincitiotrofoblasto, y la interna, citotrofoblasto. A medida que avanza el sincitiotrofoblasto hacia el endometrio, experimenta vacuolización, creándose un sistema de pequeñas cavidades en las que finalmente fluye sangre materna procedente de las arterias del útero. La degeneración de las células endometriales que determina la apertura de los vasos sanguíneos parece estar facilitada por la síntesis de sustancias que destruyen las células, tales como proteasas, durante la invasión del trofoblasto. En este momento, el trofoblasto y el feto en desarrollo están conectados por una estructura denominada pedículo de fijación, que será el que dará lugar al cordón umbilical propiamente dicho.

A medida que el sincitiotrofoblasto queda implantado en el endometrio, el citotrofoblasto interno prolifera formando un complicado sistema de proyecciones que avanzan a través del sincitiotrofoblasto hacia las cavidades de sangre materna citadas anteriormente. Estas proyecciones, denominadas vellosidades primarias, se ramificarán y resultarán vascularizadas por vasos sanguíneos fetales procedentes de las arterias del cordón umbilical. De esta forma, se utilizará una gran superficie (equivalente a más de la mitad de un campo de tenis) para realizar los intercambios entre el feto y la madre. Además, durante el mismo período, células del citotrofoblasto se extienden lateralmente y se unen para dar lugar al corion, un caparazón que envuelve el conjunto de estructuras originadas a partir del huevo fecundado.

El tejido embrionario humano establece contacto directo con la sangre materna cuando las células del trofoblasto invaden las arteriolas espirales de la pared uterina, mientras que en el desarrollo de la placenta de mamíferos más primitivos intervienen otras estructuras. El contacto íntimo que se establece queda reflejado en la descripción de la placenta humana como hemocorial. La proliferación de las células del citotrofoblasto interno se acompaña de una rápida expansión del área de implantación trofoblástica. En la octava semana del embarazo humano, la placenta ha dejado casi de crecer excepto en los extremos de las vellosidades, que

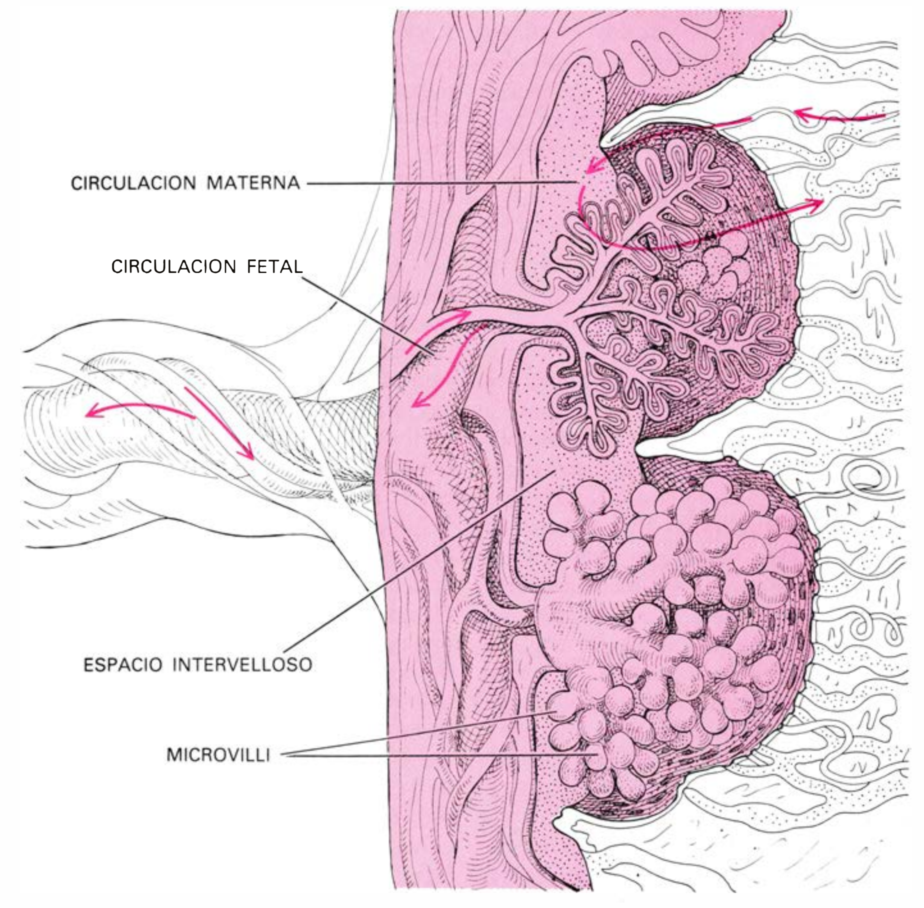
sirven también para anclar el órgano en la pared uterina.

Con la implantación del blastocisto en la pared uterina, la placenta es el resultado de dos procesos: la diferenciación final del trofoblasto en conjunción con la respuesta del revestimiento del útero que da lugar a las membranas que integran la decidua. Las membranas deciduales engloban el líquido amniótico en el que se desarrollará el feto. Cuanto más invasivo sea el trofoblasto en una especie particular, mayor será la respuesta de implantación que provoca. El trofoblasto humano, el más invasivo de los conocidos, determina la respuesta decidual uterina más pronunciada, y, en consecuencia, establece la unión más estrecha posible entre la madre y el feto.

Una vez la implantación ha tenido lugar, las células del blastocisto, a partir de las cuales se desarrolla el embrión y posteriormente el feto y la placenta, pueden considerarse como parásitos de la madre. No siendo por más tiempo independientes, pueden existir únicamente tomando las sustancias que necesitan, tales como oxígeno, nutrientes, líquido, sales, hormonas y otras, de la madre, y vertiendo las sustancias tóxicas o superfluas de desecho en el metabolismo materno.

Resulta interesante hacer notar que la invasión del endometrio por el trofoblasto se detiene posiblemente como resultado de los límites impuestos por el tejido materno más que por el trofoblasto en sí. Por ejemplo, en el cerdo apenas existe penetración del endometrio, pero el trofoblasto resulta mucho más invasivo con una implantación ectópica, es decir, no uterina, por ejemplo, en el uréter, que presumiblemente carece de la capacidad del endometrio para oponerse a una invasión profunda. En los macacos, las células endometriales que recubren el útero proliferan creando una placa subyacente al sitio de implantación, que probablemente sirve para limitar la invasión. En el mandril y otros primates, entre ellos el hombre, no aparece dicha placa y, sin embargo, siempre existe limitación de la invasión del trofoblasto (excepto en los raros casos de crecimiento placentario maligno donde desaparecen los sistemas de control). Incluso en el caso del trofoblasto humano, la penetración no rebasa la primera capa muscular subyacente al endometrio. Conviene señalar que el proceso de implantación, del que depende exclusivamente el desarrollo de la placenta, debe ser más ampliamente estudiado en los primates, hombre incluido.

La placenta a término es una estructura discoidal con un peso de alrededor de 500 gramos y con un diámetro de unos 20 centímetros. En la parte media, su espesor llega hasta tres centímetros y, en la periferia, es mucho más delgada y se continúa con el corion. Las vellosidades que se proyectan en los espacios sinusoidales de la superficie materna de la placenta dividen esta superficie en lóbulos con ramificaciones carnosas. La superficie fetal, por otra parte, se encuentra altamente vascularizada, pero es lisa. Las arterias y venas fetales que confluyen en el cordón umbilical, situado más o menos en el centro, están recubiertas por membranas. Las placentas humanas varían en tamaño, forma y peso, pero en el momento del nacimiento la relación entre el peso de la placenta y el peso del recién nacido al que ha nutrido es alrededor de un sexto.



VISION DETALLADA DE UNA SECCION TRANSVERSAL de tejido placentario en la vecindad del cordón umbilical; el esquema revela la fina estructura de los tejidos que se interpenetran y son responsables del intercambio de sangre entre madre y feto. En la madre, las células de los microvilli invaden los vasos sanguíneos de la pared uterina, por lo que su placenta se considera hemocorial.

Mecanismos de control

Como el perro de Sherlock Holmes, que no ladraba, ni siquiera los tejidos embrionarios más invasivos provocan reacciones inflamatorias ni rechazo inmunológico en la madre aunque el embrión en desarrollo es inmunológicamente extraño. La experiencia con injertos y trasplantes ha demostrado ampliamente que los tejidos extraños, cuando entran en contacto, provocan habitualmente tales reacciones y rechazos. En alguna medida, la capa protectora del tejido trofoblástico a partir de la cual se desarrolla la placenta, evita el rechazo de la masa celular interna, pero en general el rechazo materno del embrión se evitaría a través de un equilibrio delicado entre la protección trofoblástica y otros mecanismos de control adecuados a cada fase del embarazo.

Este es sólo un aspecto del sofisticado sistema de controles que rige el crecimiento de un embrión normal y la invasión por el mismo del tejido materno. Otros mecanismos regulan la extensión y duración de la replicación celular y evitan las metástasis. También dirigen la diferenciación de las células primitivas que dan lugar a la placenta y

al feto y determinan el emplazamiento y desarrollo de las células altamente diferenciadas que originan los distintos órganos y tejidos. Todos estos procesos dependen en gran medida de los mecanismos de control interno que rigen la replicación celular en los tejidos en desarrollo.

Por otra parte, la información genética contenida en el ADN de cada célula individual, y que es necesaria para un desarrollo embrionario normal, debe expresarse selectivamente por medio de la activación y bloqueo de los genes adecuados en el momento y lugar precisos. Tal patrón puede resultar modificado por factores externos a las células individuales, entre ellos componentes químicos del medio extracelular, la temperatura, las interacciones locales de tejidos vecinos y la acción de hormonas y otros mediadores que dirigen la diferenciación tisular y estimulan, inhiben o modifican el crecimiento. Las complejidades son inmensas, pero no cabe duda de que, después de una serie de ensayos sucesivos a lo largo de la evolución, el sistema funciona.

Muchas de las funciones metabólicas controladas por la placenta son prácticamente idénticas a las controladas por otros órganos. Consideraremos especialmente aquellas actividades metabólicas subyacentes a determinadas funciones de la placenta entre las cuales quepa destacar la sorprendente capacidad para un crecimiento rápido. Hemos mencionado los controles genéticos implicados en el proceso, pero tal crecimiento requiere asimismo elementos estructurales –principalmente proteínas– y la energía para disponerlos en la arquitectura celular. En la placenta tales requerimientos son mucho mayores que en cualquier otro órgano, puesto que la placenta no sólo debe crecer ella misma, sino que ha de servir al mismo tiempo de área de construcción y planta energética para el feto, que rápidamente la superará en tamaño varias veces.

El metabolismo de las proteínas en la placenta está principalmente controlado por las necesidades del crecimiento. Ningún otro órgano lleva a cabo la síntesis de proteínas tan diversas para una variedad tan grande de funciones. Las enormes cantidades de proteínas estructurales sintetizadas en los tejidos en crecimiento del feto y la placenta deben proceder de la madre; algunas de ellas, como moléculas intactas y otras en forma de sus aminoácidos constituyentes o pequeños péptidos. Sólo una pequeña parte de la materia prima procedente de la madre se encuentra ya en la forma adecuada para ser utilizada en los diferentes estadios del desarrollo fetal y placentario. Por tanto, la placenta, además de sintetizar sus propias proteínas específicas, debe seleccionar cualitativa y cuantitativamente aquellas que proceden de la madre para adecuarlas a la demanda fetal de cada momento. Especial importancia reviste la síntesis de proteínas con función hormonal y enzimática, por su papel esencial de mediadores del control genético del crecimiento y la regulación de los procesos metabólicos.

Diez semanas después de la fecundación, cuando la placenta pesa sólo 50 gramos, su producción total de proteínas es de alrededor de 1,5 gramos por día. La síntesis a término se eleva a unos 7,5 gramos diarios. Ningún otro órgano, ni siquiera el hígado, sintetiza proteínas a tal velocidad ni muestra un metabolismo tan activo. La placenta consume alrededor de un tercio del oxígeno y la glucosa aportados por la circulación materna para sus propias necesidades metabólicas; la fracción exacta depende del tamaño y actividad relativa del feto y la placenta en cada fase de la gestación.

Síntesis hormonal

La producción de hormonas reguladoras de las distintas funciones del embarazo es uno de los aspectos más interesantes de la fisiología de la placenta. Para el profano puede resultar sorprendente que sea la placenta la responsable de esta función, en lugar de la madre o el feto. El hecho es que desde los primeros días del embarazo las células del trofoblasto y sus sucesoras en la placenta producen una gran variedad de hormonas. La primera sintetizada en notables cantidades es una hormona proteica, la gonadotrofina coriónica. Muy pronto en la diferenciación del trofoblasto, esta hormona recubre las superficies celulares externas del trofoblasto, donde actuaría como una capa protectora inmunológica evitando el rechazo del blastocisto y en consecuencia facilitando la implantación. Tal como ya hemos mencionado, la síntesis de las hormonas esteroideas sexuales femeninas, los estrógenos, comienza en el blastocisto libre, donde también facilita la implantación. El hecho de que las células del pequeño y primitivo blastocisto estén ya dotadas de los mecanismos necesarios para producir cambios complejos en los esteroides revela la importancia de tales hormonas en este estadio inicial.

Al parecer, la gonadotrofina humana coriónica (GHC) ejerce algún control sobre las hormonas placentarias y preplacentarias estimulando la síntesis de estrógenos en la placenta. Las pequeñas cantidades de GHC que alcanzan el feto pueden jugar algún papel en la iniciación de la síntesis de esteroides en las glándulas adrenales en desarrollo y, en el caso del varón, en los testículos. Además, la placenta parece ejercer un control por retroalimentación sobre su producción de GHC a través de una hormona similar a las hormonas segregadas por la hipófisis para regular la actividad de otras glándulas endocrinas.

A medida que avanza el embarazo se sintetizan en la placenta grandes cantidades de progesterona a partir, principalmente, del colesterol materno. Además de mantener el embarazo, la progesterona se utiliza como materia prima para la producción de estrógenos, fundamentalmente estrona, estradiol y estriol, los cuales actúan a su vez sobre multitud de órganos y tejidos tanto en la madre como en el feto. Entre los procesos modificados por dichas hormonas cabe citar la síntesis proteica, el metabolismo del colesterol, el funcionamiento de órganos específicos como el útero y las glándulas mamarias, y la regulación de innumerables aspectos del desarrollo fetal. Quizás el hecho más extraordinario de la síntesis de hormonas esteroideas en la placenta sea la forma como colaboran la placenta y el feto, fenómeno estudiado por Dorothy B. Villee, de la Facultad de Medicina de Harvard.

La placenta humana carece de los enzimas necesarios para convertir las grandes cantidades de progesterona que sintetiza en ciertos estrógenos esenciales y otros esteroides. Villee observó que la síntesis de estas hormonas a partir de la progesterona se lleva a cabo en células de la "zona fetal": grupos de células localizados en las glándulas adrenales en desarrollo del feto que, aunque carecen de los enzimas necesarios para sintetizar progesterona, poseen los requeridos para su conversión. De esta forma, los tejidos fetal y placentario se complementan entre sí. De hecho, parte del estrógeno "fetal" incluso vuelve a la placenta para ser modificado ulteriormente. Cuando las glándulas endocrinas del feto han madurado lo suficiente para sintetizar sus propias hormonas esteroideas, las

células de la zona fetal disminuyen gradualmente y acaban por desaparecer cuando ya no se requieren por más tiempo. En las distintas especies investigadas, las funciones particulares de las células de la zona fetal y de la placenta difieren, pero en todos los casos resultan complementarias y no se superponen. Presumiblemente, este sofisticado y transitorio sistema de colaboración está organizado y cronológicamente controlado con precisión por la información genética y está regulado por hormonas específicas.

A juzgar por la gran variedad de hormonas proteicas sintetizadas en la placenta con función reguladora, entre las que se encuentran dos (gonadotrofina coriónica y lactógeno placentario) detectadas sólo en el embarazo, el control ejercido por la placenta durante la gestación no es menos amplio que el ejercido por la hipófisis a lo largo de la vida. Mediante dichas hormonas, la placenta no sólo cumple las funciones propias de la hipófisis fetal hasta que dicho órgano madura y realiza sus propias funciones, sino que dirige la orquesta endocrina del embarazo, que actúa en gran medida en la propia placenta. Las hormonas proteicas actúan sobre otras hormonas fundamentalmente esteroideas, regulando prácticamente todas las actividades citadas. Para continuar con la analogía de la orquesta, si el ADN proporciona la partitura y las instrucciones detalladas para los instrumentos que deben ejecutarla, las hormonas proteicas elaboradas por la placenta y la hipófisis coordinan la actuación utilizando hormonas esteroideas como mediadores.

Protección inmunológica

Entre los procesos fisiológicos del embarazo que requieren una coordinación precisa se encuentran los relacionados con la protección del embrión frente al rechazo inmunológico por los tejidos maternos. Uno de los mecanismos que desarrollan una parte de esta función es la supresión no específica de linfocitos, las células que normalmente mediarían en el rechazo del injerto. En el laboratorio, al menos la actividad de los linfocitos puede suprimirse por múltiples sustancias sintetizadas a lo largo del embarazo normal, entre ellas la gonadotrofina coriónica, el lactógeno placentario y la prolactina como hormonas proteicas, y las hormonas esteroideas cortisona, progesterona y estrógenos, así como una gran variedad de otras proteínas y glicoproteínas.

Como ya hemos mencionado, el embrión puede recibir protección física por parte de grandes células estrechamente empaquetadas, las células deciduales, que lo rodean después de la implantación del blastocisto. Esta barrera protectora bloquea el drenaje de linfocitos hacia los tejidos maternos. Además, los vasos sanguíneos maternos no invaden el trofoblasto ni la placenta y de esta forma se bloquea una segunda vía que conduce al rechazo de los injertos. En los primeros estadios del desarrollo del trofoblasto se consigue una protección adicional por la falta de expresión de antígenos: las sustancias que estimulan la producción de anticuerpos específicos frente a ellos dando lugar al rechazo del injerto. Por estas razones, aunque el tejido embrionario sea extraño se disimula el hecho, al menos transitoriamente.

Por otra parte existen datos que prueban la existencia de antígenos correspondientes a una gran variedad de tejidos en el trofoblasto. W. D. Billington, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Bristol, ha puesto de manifiesto que los anticuerpos producidos para atacar dichos antígenos podrían tener importancia clínica tanto para la inducción del aborto como para la inmunoterapia de cánceres placentarios, como el coriocarcinoma. Aunque es posible que en el curso del embarazo se produzcan tales anticuerpos en tejidos maternos, también lo es que, al igual que otros mecanismos de rechazo, sean neutralizados por un delicado equilibrio de fuerzas protectoras. Citando a Billington, "las propiedades inmunológicas peculiares del trofoblasto y los diversos procesos inmunorreguladores maternos aparentemente consiguen... prevenir las reacciones de rechazo resultantes de la incompatibilidad tisular feto-materna". El autor considera que los distintos elementos del complejo equilibrio inmunológico surgieron en diferentes momentos a lo largo de la evolución. Guy Voisin y colaboradores, del Centro de Inmunopatología del Instituto Nacional de la Salud e Investigación Médica de París, han ido más allá al sugerir que "los tumores pueden considerarse tejidos patológicos que han aprendido y utilizado algunos de los trucos de la placenta", para evitar el rechazo por los tejidos del organismo en que se desarrollan.

Otra función inmunológica altamente específica de la placenta consiste en aportar al feto, al final del embarazo, los anticuerpos maternos del tipo conocido como inmunoglobulinas. Estos anticuerpos son la expresión de la experiencia materna y de su resistencia frente a distintas infecciones, y dotan al recién nacido de una profilaxis frente a varias infecciones hasta que su propio sistema inmunitario empieza a funcionar. Los anticuerpos son moléculas demasiado grandes para difundir a través de la placenta y perderían su actividad si se fragmentaran, por lo que han de acarrearse mediante mecanismos de transporte activo que requieren energía. Tales sistemas de transporte, altamente específicos, prefieren a veces grandes moléculas de anticuerpos a expensas de otras más pequeñas, en razón de las necesidades del feto.

Un hecho sorprendente del transporte activo de anticuerpos es que estas moléculas sean transportadas a través de un tejido que normalmente protege al embrión del ataque inmunológico y destruye moléculas proteicas de tamaño parecido a los anticuerpos. A. D. Wild, de la Universidad de Southampton, observó que podrían utilizarse sistemas de transporte altamente especializados, que son independientes del tejido a través del cual conducen sustancias, para dirigir drogas terapéuticas hasta un órgano o tejido particular. En algunos casos, sería deseable bloquear dichos sistemas en la placenta, por ejemplo, para evitar que los anticuerpos Rh maternos alcanzaran el feto y atacaran sus glóbulos rojos.

Envejecimiento de la placenta

Desde hace tiempo, los tocólogos saben que algunas placentas experimentan cambios, al parecer de envejecimiento, hacia el final del embarazo. De hecho, después del desarrollo completo, la aparición de depósitos de calcio y de infartos fibrosos, áreas de tejido muerto resultantes del endurecimiento y oclusión de las arterias placentarias, retraen la placenta y le dan una consistencia dura y un aspecto aparentemente envejecido. ¿Pueden tales cambios atribuirse realmente al envejecimiento? Dicho de otra forma, ¿está programada genéticamente la placenta para cumplir su tarea de nueve meses y poco más?

Estas cuestiones son de respuesta muy difícil. El tocólogo, a la vista de una placenta aparentemente envejecida y de un recién nacido de pequeño tamaño, puede asumir que la placenta resultaba inadecuada para nutrir al feto, por lo que éste sufría de "insuficiencia placentaria". Sin embargo, es

también posible que el programa genético que rige el crecimiento del feto y de la placenta determine que ambos sean más pequeños de lo habitual. Un feto que dé lugar a un recién nacido pequeño requiere una placenta pequeña. Aunque cualquiera puede reconocer los efectos del envejecimiento a simple vista, resulta mucho más difícil identificar los fenómenos específicos o sus causas. No existen en la actualidad criterios firmes sobre los cambios de la placenta que son un índice de envejecimiento. Así por ejemplo, los depósitos calcificados que parecen una señal incontrovertible de envejecimiento, se observan a menudo en la placenta de recién nacidos que no han experimentado ninguna deficiencia placentaria, existiendo además datos que sugieren que el desarrollo de tales depósitos es reversible.

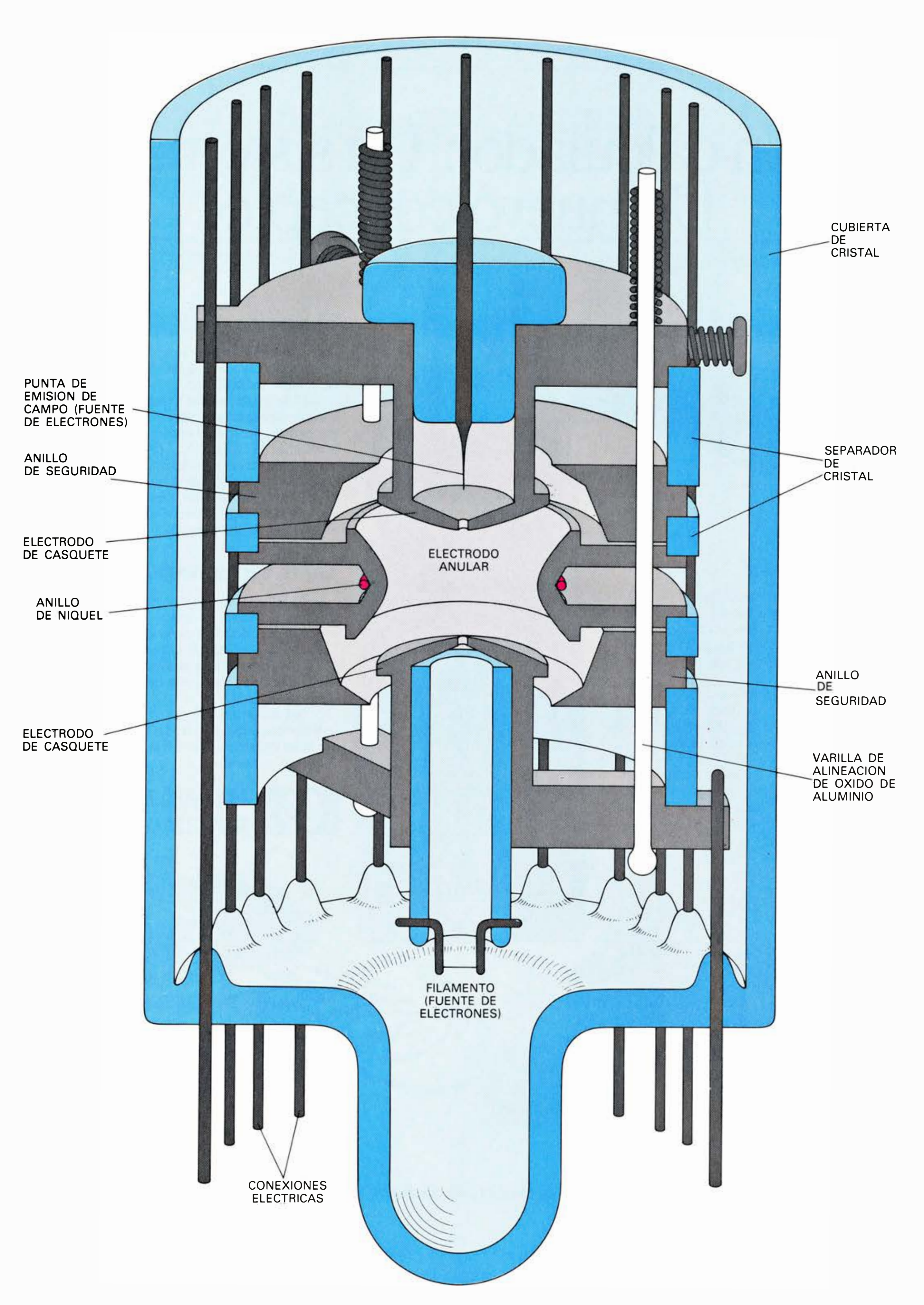
Además, es asunto muy discutible si tales cambios interfieren necesariamente con la función de la placenta. Willi Hijmans, del Instituto Experimental Gerontológico de Rijswijk, Holanda, ha sugerido que la placenta madura pero no envejece. Si este es el caso y la placenta es un órgano que madura y luego permanece en condiciones óptimas hasta que finalmente se detiene su funcionamiento, constituiría un modelo ideal para las investigaciones gerontológicas. Por otra parte, resulta interesante la observación de que, a medida que avanza el embarazo, la síntesis de fosfolípidos en la placenta aumenta; efectos similares han sido observados en las arteriolas de hombres de edad avanzada y en mujeres que han tomado anticonceptivos durante un largo período de tiempo.

La placenta como animal de experimentación

En muchos campos, la placenta humana puede utilizarse como "animal" de experimentación de incalculable valor por su extraordinaria ventaja de ser humana. Especialmente importante es su utilización en el área de la investigación obstétrica, en particular en el estudio de las anomalías congénitas. Por ejemplo, en el caso de las enfermedades hereditarias en las que se hayan detectado defectos enzimáticos, la placenta representa la biopsia humana de mayor tamaño. Además, el feto está expuesto en general a las mismas drogas, aditivos de la alimentación y agentes contaminantes del medio que la madre. Durante el primer trimestre, este hecho reviste una gran importancia debido a que los tejidos fetales y placentarios se están diferenciando y, tal como demostró trágicamente la talidomida, son muy susceptibles de ser dañados. En colaboración con nuestros colegas de la Universidad de Londres, estamos investigando los mecanismos a través de los cuales la placenta modifica la estructura química de las drogas y, en consecuencia, su acción, con la esperanza de ser capaces algún día de poder observar directamente los efectos de los fármacos en los tejidos humanos.

Debido a la capacidad de la placenta para una replicación celular rápida, resulta muy adecuada para el ensayo de la toxicidad de distintas sustancias y para el estudio de las drogas que inhiben la división celular y se emplean para el tratamiento del cáncer. Resulta evidente que la placenta es potencialmente un instrumento importante para evaluar compuestos químicos en general. Además, la placenta en desarrollo es un modelo excelente para el estudio de la replicación celular normal y patológica. Debido a su crecimiento rápido, a su carácter invasivo y al mosaico de actividades metabólicas que desarrolla, la placenta no difiere apreciablemente de un tumor canceroso. La única diferencia sorprendente entre los dos consiste en que el crecimiento de la placenta tiene frenos. Sería interesante conocer dónde se encuentran tales frenos y cómo actúan.

Podría resultar desafortunada la aparente simplicidad de la bacteria *Escherichia coli*, que sedujo tanto a los estudiosos que la convirtieron en el organismo básico de la investigación genética. Si se hubieran utilizado las células placentarias con el mismo propósito, aunque las dificultades iniciales hubieran sido mayores, dispondríamos hoy de un modelo universal de origen humano. Todos los mecanismos y estímulos que afectan a la replicación celular pueden estudiarse en las células placentarias in vivo, in vitro o en cultivo de tejidos. Además, las células placentarias son reemplazadas por replicación; la placenta puede utilizarse para la investigación de señales de iniciación tanto de replicación normal como de aquellas que preceden a un cambio maligno. Finalmente, la placenta puede servir también para investigar la regulación de la expresión genética y el mecanismo de acción de los represores genéticos. Tales investigaciones podrían rendir su máximo fruto si permitieran la neutralización del código genético del cáncer.


CUBIERTA
DE
CRISTAL
PUNTA DE
EMISION DE
CAMPO (FUENTE
DE ELECTRONES)
ANILLO
DE SEGURIDAD
SEPARADOR
DE
CRISTAL
ELECTRODO
DE CASQUETE
ELECTRODO
ANULAR
ANILLO
DE NIQUEL
ANILLO
DE
SEGURIDAD
ELECTRODO
DE CASQUETE
VARILLA DE
ALINEACION
DE OXIDO DE
ALUMINIO
FILAMENTO
(FUENTE DE
ELECTRONES)
CONEXIONES
ELECTRICAS

El electrón aislado

Mediante un único electrón atrapado en un átomo artificial de tamaño microscópico se puede medir con precisión no superada una propiedad del electrón llamada el factor g

Philip Ekstrom y David Wineland

El electrón es una partícula material de notable sencillez. Tiene masa y carga eléctrica; gira (o parece girar) con una cantidad fija de momento angular y posee un momento magnético, de manera que un campo magnético externo ejerce una fuerza de giro sobre él. Estas cuatro magnitudes constituyen todas las propiedades conocidas del electrón; una vez establecidos sus valores, no hay nada más que decir sobre el mismo.

Podría argumentarse que el electrón es aún más sencillo que lo que puede sugerir esta lista de propiedades, apoyándonos en que las cuatro cantidades no son independientes; antes bien, cualquiera de ellas puede obtenerse de las otras tres. Por ejemplo, el momento magnético del electrón está relacionado con su masa, carga y spin (giro) mediante una constante de proporcionalidad llamada factor g. En la moderna teoría de los electrones, el factor g puede calcularse con gran precisión; también puede medirse experimentalmente. Mediciones que constituyen, por tanto, una prueba tangible de la teoría. Aunque tanto el cálculo como la medida son difíciles, se han refinado en tal manera que el factor g del electrón se conoce ahora con una exactitud mayor que cualquier otra constante física. Los valores obtenidos por vía teórica y experimental están de acuerdo hasta la última cifra decimal conocida.

Una serie de experimentos que se han llevado a cabo durante algunos años en la Universidad de Washington han culminado recientemente en una nueva medida del factor g, que ha establecido un nuevo récord de precisión. Los experimentos empleaban una técnica nueva en la que un único electrón se confinaba durante semanas en una "trampa" formada por campos eléctricos y magnéticos. De hecho, el electrón y el aparato confinante formaban un átomo de dimensiones macroscópicas y de núcleo extraordinariamente pesado. Como el aparato se apoyaba finalmente sobre la tierra, el núcleo podía incluso identificarse con la propia tierra, por cuyo motivo al átomo artificial se le dio el nombre de geonium, el átomo de la tierra. El movimiento del único electrón del geonium es diferente del de un átomo ordinario y es más accesible a la manipulación y a la medida. Por estas razones fue posible medir el factor g con una incertidumbre menor que una parte en diez mil millones.

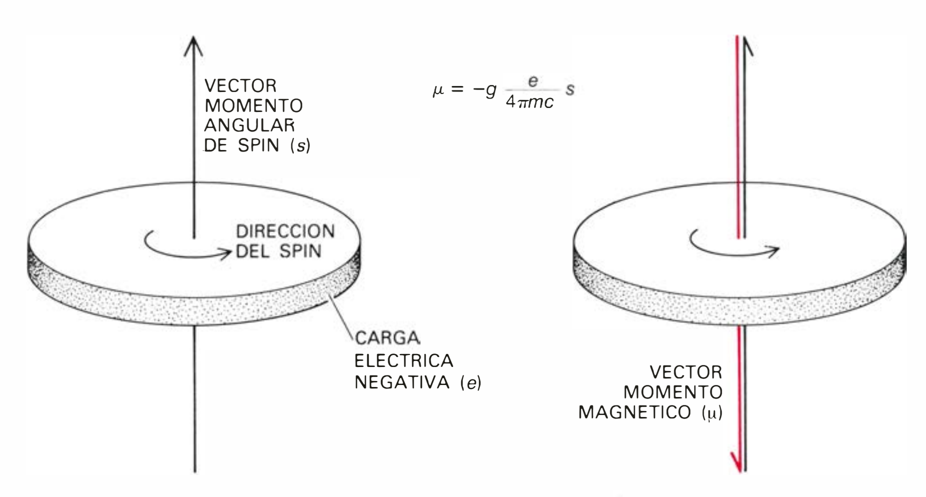
Cuando en 1897 J. J. Thomson descubrió el electrón, se vio inmediatamente que la partícula tenía masa y carga eléctrica; de hecho, Thomson llegó a su descubrimiento midiendo la razón de la masa a la carga. También se suponía, al menos implícitamente, que el electrón tenía las propiedades mecánicas familiares características de la materia macroscópica, tales como tamaño y forma definidos. Algunos años más tarde, durante el desarrollo de la teoría cuántica, se añadieron a la lista de propiedades un momento magnético y una cantidad intrínseca de momento angular de spin, siguiendo una propuesta hecha por Samuel A. Goudsmit y George E. Uhlenbeck. El spin y el momento magnético eran necesarios para explicar ciertos hechos observados en el espectro de la luz emitida o absorbida por los átomos.

Con estas propiedades parecería que el electrón podría comprenderse en términos de un modelo mecánico simple. El electrón podría imaginarse como una partícula material con tamaño y forma definidos y con una carga eléctrica negativa distribuida sobre su superficie. Se exigiría que la partícula girara alrededor de un eje, de manera parecida a como lo hace la Tierra, con una cierta cantidad constante de momento angular.

En este modelo, el momento magnético del electrón tiene una explicación clara. La rotación de un cuerpo con carga sobre su superficie entraña necesariamente una circulación de carga eléctrica, o en otras palabras, una corriente eléctrica. La corriente circulante da lugar a un campo magnético en el electrón, de la misma manera que lo hace en los arrollamientos de un electroimán. Tanto el momento angular de spin como el momento magnético pueden representarse mediante vectores, o flechas, alineados según el eje de giro. Por convención (y debido a que la carga del electrón es negativa), los vectores que representan el spin y el momento magnético están en direcciones opuestas.

Siguiendo el razonamiento en el contexto de este modelo mecánico se esperaría que el momento magnético fuese proporcional a la corriente eléctrica circulante en el perímetro del electrón que gira. La corriente debería ser directamente proporcional a la carga eléctrica total y a la velocidad de rotación. La velocidad de rotación, a su vez, debería ser directamente proporcional al momento angular de spin e inversamente proporcional a la masa del electrón. La relación entre estas cantidades, junto con algunos factores

TRAMPA PARA UN ELECTRON que captura la partícula en una configuración especial de campos eléctricos y magnéticos. El electrón ocupa la cavidad central formada por los dos electrodos de casquete y el electrodo de anillo, que se construyen de una forma determinada matemáticamente: son hiperboloides. Los dos electrodos adicionales, los anillos de seguridad, compensan las imperfecciones del campo eléctrico. Todo el aparato, que tiene algo menos de cuatro centímetros de diámetro, está inmerso en helio líquido e insertado en el centro de un imán superconductor. El electrón está ligado mediante la combinación de los campos estáticos eléctrico y magnético de la trampa, de manera parecida a como un electrón de un átomo está ligado al núcleo. Aquí el papel de núcleo lo desempeña el aparato, o incluso la tierra sobre la que reposa el aparato, razón de que el átomo se llame geonium, el átomo de la tierra.



PROPIEDADES DEL ELECTRON son carga eléctrica (*e*), masa (*m*), momento angular de spin (*s*) y momento magnético (μ) Un ingenuo modelo mecánico concibe el electrón como un disco giratorio con carga eléctrica distribuida en su perímetro. Es la corriente de la carga circulante lo que da lugar al momento magnético, y el momento puede deducirse, por tanto, de las otras tres propiedades. La relación se define mediante una ecuación en la cual aparece una constante de proporcionalidad llamada factor *g*. El signo menos de la ecuación significa que el momento es opuesto al vector de spin. La teoría moderna de los electrones no permite una representación gráfica como ésta, pero la relación entre el momento magnético y el spin aún se mantiene, y *g* puede calcularse con gran precisión. En los experimentos del geonium *g* se mide con la misma precisión. Teoría y experimentación concuerdan estrechamente.

numéricos necesarios para la coherencia del sistema de unidades, puede expresarse sucintamente mediante una ecuación:

$$\mu = -g \frac{e}{4\pi mc} s.$$

En esta ecuación, μ (la letra griega mu) simboliza el momento magnético del electrón, s es el momento angular de spin, e representa la carga, m es la masa y c, la velocidad de la luz en el vacío. La constante de proporcionalidad en la ecuación es el factor g, un número adimensional. El factor g determina el tamaño del momento magnético generado por un cierto spin, carga y masa. El signo menos que precede al factor g significa que el momento magnético es antiparalelo al momento angular de spin.

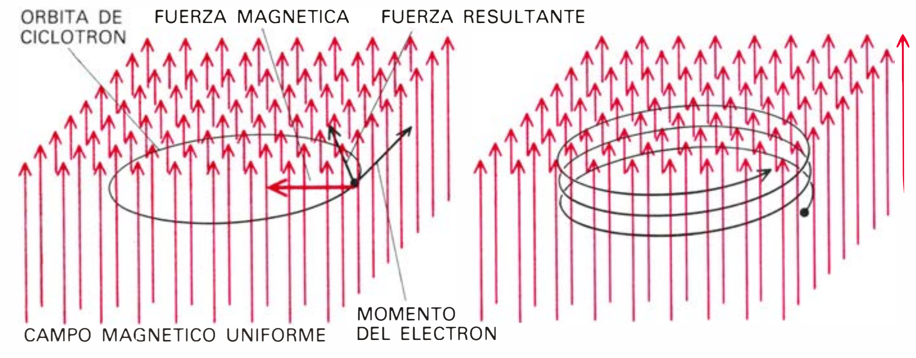
En este modelo mecánico, el valor asignado a g depende críticamente de la forma y tamaño del electrón y de cómo esté distribuida la carga eléctrica sobre su superficie. Los primeros valores experimentales de g se obtuvieron a partir de las mismas observaciones espectroscópicas que sugirieron la existencia de un momento angular intrínseco de spin. Dichas observaciones indicaron que g era aproximadamente igual a 2. Algunos años más tarde, una versión más refinada de la teoría cuántica, formulada por P. A. M. Dirac de manera que fuera coherente con la teoría de la relatividad especial, posibilitó un cálculo teórico preciso de g; el valor predicho fue exactamente 2, de acuerdo con las pruebas observacionales disponibles entonces.

Resulta un poco ingenuo imaginarse el electrón como un cuerpo rígido en rotación. Al fin y al cabo, el movimiento de la partícula debe describirse mediante las leyes de la mecánica cuántica, en las cuales las nociones de tamaño y velocidad no pueden ni siquiera definirse más allá de un cierto nivel de precisión. El modelo tiene, en realidad, defectos graves, algunos de los cuales ya fueron reconocidos a los pocos días de su proposición. Por ejemplo, resulta que la velocidad rotacional en la superficie del electrón es mayor que la velocidad de la luz. El tamaño atribuido al electrón constituye otra fuente de dificultad. La masa o energía de una partícula eléctricamente cargada es función inversa de su tamaño. Que es así puede entenderse observando que hace falta energía para empaquetar la carga negativa, que se repele, del electrón en un volumen finito. Cuanto menor sea el volumen, mayor será la energía necesaria. Según este esquema, la pequeña masa o energía del electrón implica que debería de tener un tamaño bastante grande. Sin embargo, los experimentos en que los electrones son dispersados por otras partículas miden efectivamente el tamaño del electrón e indican que el radio debe ser extremadamente pequeño. Todos los datos experimentales acumulados hasta ahora concuerdan con la idea de que el electrón es una partícula puntual, completamente inextensa. Los argumentos presentados aquí predicen entonces que la masa del electrón es infinita: un claro absurdo.

Las mediciones refinadas del factor g del electrón suministran una nueva razón para dudar de la precisión del modelo mecánico y de la propia teoría de Dirac. Las pruebas experimentales han mostrado que g no es exactamente 2, sino que viene a ser un 0,1 por ciento mayor que 2; en otras palabras, su valor es aproximadamente 2,002. La teoría de Dirac no puede dar cuenta de tal desajuste.

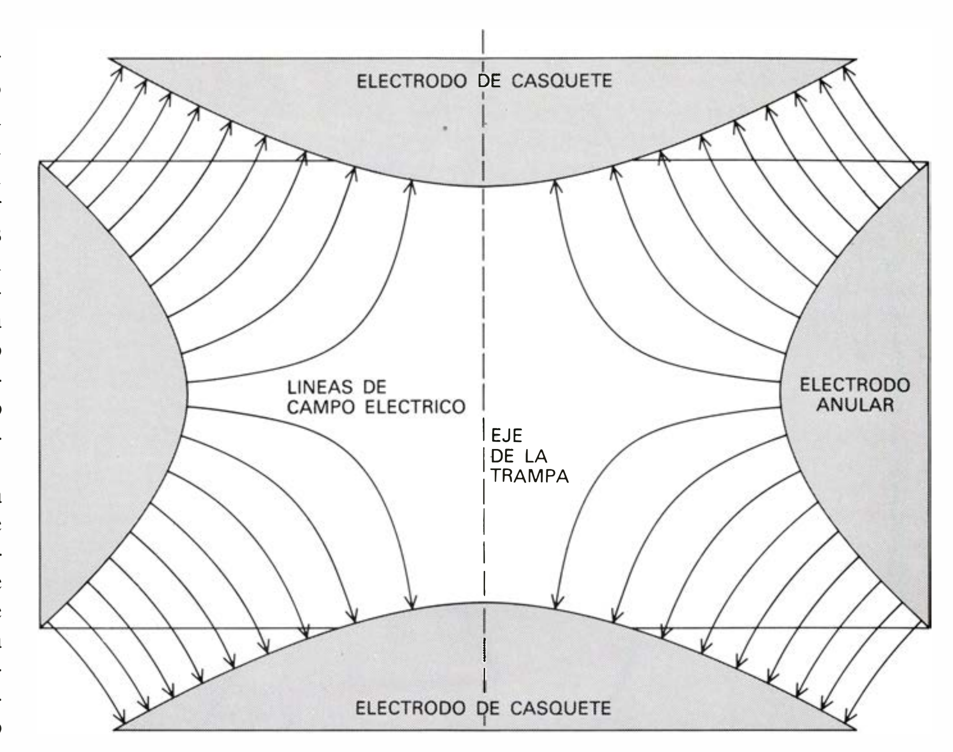
En la década iniciada en 1940, estos problemas se resolvieron abandonando el modelo mecánico del electrón y planteando una nueva y más abstracta teoría, la electrodinámica cuántica. En la electrodinámica cuántica se permite que el electrón sea una partícula puntual, sin dimensiones y, al menos en principio, de masa infinita. Sorprendentemente, hay un procedimiento matemático (llamado renormalización) que cancela este infinito y recupera las propiedades finitas observadas del electrón, incluyendo el factor g.

No está en absoluto claro cómo una



CONFINAMIENTO DE UN ELECTRON en un campo magnético uniforme como resultado de la acción del campo sobre la carga eléctrica en movimiento. El electrón está sometido a una fuerza dirigida perpendicularmente al campo y a la dirección del movimiento de la partícula. La aplicación continua de la fuerza desvía al electrón en una trayectoria circular, que se llama la órbita ciclotrónica (porque es la que se emplea en un ciclotrón para acelerar un electrón). El tamaño de la órbita aumenta en cantidades discretas a medida que la energía y velocidad del electrón aumentan. Por este mecanismo, el electrón está obligado a girar en una región limitada del campo, pero no está aún confinado; puede desplazarse paralelamente a las líneas del campo, de manera que su trayectoria se convierta en una hélice.

partícula con radio nulo pueda tener momento angular de spin o momento magnético. Aunque la electrodinámica cuántica no ofrece una imagen mental coherente, proporciona sin embargo un procedimiento explícito para calcular los valores numéricos de las distintas propiedades del electrón. La relación entre el momento magnético del electrón y su spin, carga y masa tiene la misma forma que tenía en el modelo mecánico y la constante de proporcionalidad de la ecuación es el mismo factor g. Además, una primera aproximación sigue dando el valor $g = 2$. Pero esto es sólo una aproximación, a la cual se le puede aplicar una serie infinita de correcciones progresivamente más pequeñas. Aunque no es viable buscar el valor exacto de g mediante este método, pues debería incluirse la serie completa de términos en el cálculo, se puede alcanzar cualquier precisión finita evaluando un número finito de términos.



CAMPO ELECTRICO generado por los voltajes/aplicados a los electrodos de la trampa. Dicho campo eléctrico se superpone al campo magnético uniforme. Por estar el electrón cargado negativamente, el campo eléctrico ejerce una fuerza sobre él que está dirigida en sentido opuesto a las líneas del campo. La fuerza tiene una componente vertical, de manera que un electrón que se desplace hacia cualquiera de los electrodos de casquete se verá obligado a retroceder hacia el plano central. En general, el electrón superará el plano medio de forma que oscilará paralelamente al eje de la trampa. El campo eléctrico también tiene una componente radial, que empuja al electrón hacia el electrodo de anillo. Sin embargo, el movimiento radial es opuesto al producido por la acción del campo magnético, de manera que el electrón se desvía en una órbita circular, llamada órbita magnetrónica. Por tanto, el electrón está completamente cautivo entre los campos eléctrico y magnético combinados, pero su movimiento es complejo.

A partir de 1950 se emprendieron una serie de mediciones experimentales del factor g por parte de H. R. Crane y algunos de sus colegas y estudiantes de la Universidad de Michigan. No se medía g, sino la discrepancia entre g y 2; y así el proyecto fue conocido como el experimento del g menos 2. En las dos décadas siguientes Crane, Arthur Rich y sus colaboradores proporcionaron una sucesión de valores de precisión cada vez mayor. Durante el mismo período, los teóricos trabajaron en la evaluación de términos de la serie infinita cada vez más complicados. La competición consiguiente entre teoría y experimento estuvo marcada por algunos pequeños errores y sus subsiguientes correcciones, pero en 1972 los valores de g calculados y medidos estaban de acuerdo en más de ocho cifras significativas. Un beneficio incidental de esta competición fue el desarrollo de nuevos métodos tanto para los cálculos teóricos como para los experimentos. Parecía que cada cifra decimal adicional exigía alguna innovación técnica.

En los experimentos de Michigan se pasaba un haz de electrones a través de un campo magnético en un aparato en el cual la orientación del eje de spin de los electrones podía determinarse a la entrada y a la salida. El campo aplicado tenía dos efectos sobre los electrones: hacía que su eje de spin precesionara y determinaba que los propios electrones describieran una órbita circular o en espiral. Si g valiera exactamente 2, la frecuencia de la precesión del spin y la frecuencia de la órbita serían iguales. El experimento medía la diferencia entre las frecuencias, determinando por tanto $g - 2$.

La exactitud de este método está limitada principalmente por la naturaleza estadística de un experimento realizado con muchos electrones interactuantes y por las deficiencias en el conocimiento, por parte del experimentador, de lo que sucede a un electrón durante la medición. Cada electrón se mueve a través del aparato a gran velocidad y su tiempo de permanencia en el campo magnético es muy inferior al segundo. Durante este intervalo, puede ver alterada su trayectoria por inhomogeneidades del campo y por encuentros con otros electrones del haz. El grupo de Michigan sigue mejorando el experimento, intentando controlar estas incertidumbres.

Una estrategia alternativa para mejorar la medición de g consistía en confinar un único electrón que se moviera lentamente, durante un largo período, en un entorno que fuera lo suficientemente sencillo para poderse analizar con precisión. Este fue el plan adoptado en los experimentos del geonium hechos en la Universidad de Washington. El objetivo de estas mediciones –un objetivo al que uno se puede aproximar pero nunca alcanzar– era aislar un electrón de todas las influencias extrañas y mantenerlo así para su examen. El confinamiento de electrones libres, durante períodos largos, fue concebido hace más de 20 años por Hans G. Dehmelt, de Washington; el trabajo que aquí describimos se realizó bajo su dirección. Las técnicas para preparar y observar un electrón aislado fueron desarrolladas principalmente por nosotros, aunque nuestro trabajo se basó en los experimentos con nubes de electrones atrapadas llevados a término por nuestros predecesores Fred L. Walls y Talbert S. Stein. Desde que dejamos el proyecto, las técnicas han sido refinadas aun más por Robert S. Van Dyck, Jr., y Paul B. Schwinberg, quienes han medido el factor g con mayor precisión.

A fin de entender el comportamiento del electrón en el átomo de geonium, conviene considerar primero un sistema ideal más sencillo: un electrón en reposo en un campo magnético uniforme. Podemos representar un tal campo mediante líneas de flujo que sean paralelas y uniformemente espaciadas. La energía de este electrón

TRES MODOS DE MOVIMIENTO del electrón en la trampa combinados para dar una trayectoria complicada. El electrón gira rápidamente en la órbita de ciclotrón; al mismo tiempo, el centro de la órbita ciclotrónica sigue la trayectoria circular mucho más grande del movimiento magnetrónico; durante todo el tiempo, el electrón está oscilando a lo largo del eje de la trampa. Ni las frecuencias ni las amplitudes de los distintos modos están representados a escala. En cada órbita magnetrónica el electrón realiza unas 2000 oscilaciones axiales y 1,4 millones de revoluciones ciclotrónicas.

estacionario depende de la orientación de su momento magnético con respecto al campo externo. La energía es mínima cuando el momento y el campo son paralelos y máxima cuando son antiparalelos.

Resulta que estas dos orientaciones del electrón, que se llaman corrientemente "spin hacia abajo" y "spin hacia arriba", son las únicas posibles. Todas las orientaciones intermedias en las que el momento magnético sería perpendicular al campo o lo cruzaría oblicuamente están prohibidas por las reglas de la mecánica cuántica. (Para ser exactos, dichas reglas se aplican a la orientación del eje de spin y sólo indirectamente al momento magnético. Sin embargo, como los dos vectores siempre apuntan en direcciones precisamente opuestas, la orientación del electrón puede definirse con referencia a cualquiera de ellas.)

Debido a que el electrón sólo tiene dos posibles orientaciones, un electrón estacionario en un campo magnético uniforme tiene exactamente dos niveles energéticos distintos. La diferencia de energía entre los niveles es el producto de tres cantidades. Una de estas cantidades es una combinación de constantes fundamentales llamada el magnetón de Bohr, que define el acoplamiento entre un campo magnético aplicado y el momento magnético de una partícula. El magnetón de Bohr se define como la constante de Planck, h, multiplicada por $e/4\pi mc$. Las otras dos cantidades que determinan los niveles de energía son la intensidad del campo externo y el factor g. Cualquier medida de g exige en última instancia que se mida esta diferencia de energía en un contexto en el que la intensidad del campo aplicado pueda también determinarse. En los experimentos concretos no hace falta conocer la intensidad del campo con precisión.

Un electrón en reposo es una ventaja, pero se trata de una ventaja ficticia; el principio de incertidumbre de la mecánica cuántica asegura que ninguna partícula ligera como el electrón puede estar quieta mucho rato. Ahora bien, si el electrón debe estar siempre en movimiento, un campo magnético puede al menos confinar su movimiento en una cierta región. El confinamiento surge de la interacción del campo con la carga de la partícula. Si el electrón se mueve perpendicularmente al campo, aparece una fuerza que empuja al electrón perpendicularmente a su dirección original de movimiento y al campo. Como resultado de ello la trayectoria del electrón se convierte en un círculo.

Cuando la energía y velocidad del electrón aumentan, también lo hace el diámetro de la órbita circular. En realidad, la velocidad y el diámetro de la órbita cambian en consonancia, de manera que el tiempo necesario para completar una vuelta es casi constante. En otras palabras, el período del movimiento del electrón es constante (o casi), con independencia de cuál sea su velocidad o energía. La constancia del período orbital se pierde sólo por un efecto de la relatividad especial: a mucha velocidad, la masa del electrón aumenta de manera que el período de revolución se hace algo más largo. Sin embargo, para electrones de baja energía la corrección relativista es pequeña. El movimiento orbital de un electrón en un campo magnético se llama movimiento ciclotrónico, porque es el que se emplea en un ciclotrón para acelerar los electrones u otras partículas cargadas.

En ese punto, la mecánica cuántica interviene de nuevo para modificar el movimiento del electrón. En física clásica, o precuántica, un electrón que circule por un campo magnético puede tener cualquier energía arbitraria y así puede describir una órbita de cualquier diámetro. En la teoría cuántica sólo se permiten ciertas energías y tamaños orbitales discretos. Hay una órbita de tamaño mínimo, seguida por una serie de órbitas mayores asociadas a energías crecientes; las órbitas de tamaños intermedios están prohibidas. Cada una de las órbitas permitidas está especificada por un número cuántico, n, que sólo puede tomar valores enteros y positivos (0, 1, 2, 3,...).

Como las órbitas ciclotrónicas están cuantificadas, si dibujamos los niveles energéticos permitidos al electrón obtendremos una escalera. El primer escalón corresponde a la órbita menor de más baja energía, y cada escalón sucesivo representa la siguiente órbita y el siguiente estado energético en sentido creciente. Y lo que es más importante, el espaciado entre los escalones es casi constante (y resultaría exactamente constante si los efectos relativistas pudieran ignorarse). La diferencia de energía entre los escalones es igual a dos veces el magnetón de Bohr multiplicado por la intensidad del campo magnético aplicado. Estas son las mismas cantidades que aparecen en la diferencia de energías entre los estados de spin abajo y arriba, con un cambio importante: el factor g es sustituido por el entero exacto 2. La similitud de las dos fórmulas sugiere un método para medir g, o al menos para medir la razón de g a 2, sin conocer con gran precisión la intensidad del campo magnético o el valor del magnetón de Bohr. Basta con medir, bajo las mismas condiciones, el espaciado energético entre los estados de spin y el espaciado entre estados orbitales sucesivos. Dividiendo una energía por la otra se obtiene una razón en la que el magnetón de Bohr y la intensidad de campo aparecen en el numerador y en el denominador, de manera que se cancelan.

En la práctica, no hay manera de "desconectar" el spin mientras se mide el tamaño de la órbita, ni puede convencerse al electrón de que se esté quieto mientras se determina la energía de su orientación de spin. Cualquier estado real del electrón tiene una energía determinada a la vez por su órbita y por la dirección de su spin. Conviene separar estos estados combinados en dos escaleras de energía adyacentes. Una escalera representa todos los estados con el spin hacia arriba y la otra escalera incluye todos los estados con spin hacia abajo. En cada escalera, los escalones, que se designan mediante el número cuántico principal, n, corresponden a órbitas sucesivamente mayores. Aunque la separación entre dos escalones cualesquiera es la misma en ambas escaleras, una escalera está desplazada en bloque con respecto a la otra en una cantidad igual a la energía necesaria para cambiar, o invertir, el spin. Como esta energía es aproximadamente igual a la separación entre escalones, una escalera empieza aproximadamente un escalón más arriba que la otra.

En este sistema existen tres clases de transiciones posibles. Supongamos que inicialmente el electrón tiene la mínima energía posible: su spin está hacia abajo de forma que su momento magnético es paralelo al campo, y su órbita ciclotrónica es la mínima permitida, con n igual a 0. El electrón ocupa, por tanto, el escalón inferior de la escalera de energías más baja. Una primera transición dejaría fija la orientación del spin, pero aumentaría la órbita hasta el siguiente tamaño permitido; esta transición corresponde a subir un peldaño de la misma escalera de energía, llegando al estado $n = 1$. La energía necesaria para producir el cambio es igual al espaciado entre los escalones, que valdrá, por tanto, 2 veces el magnetón de Bohr por la intensidad del campo.

Alcanzado este nivel, otra transición

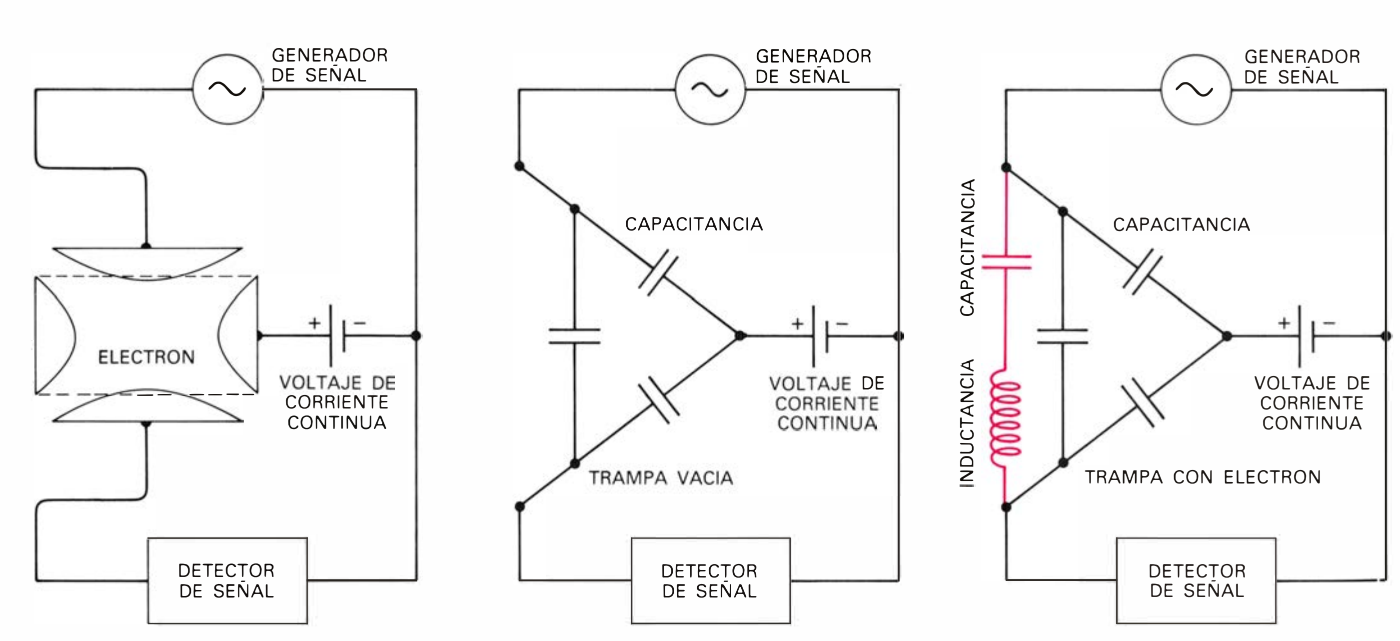
puede invertir el spin del electrón sin alterar la órbita, de manera que el electrón pasaría del nivel $n = 1$ de la escalera de spin abajo al nivel correspondiente de $n = 1$ de la escalera de spin arriba. La energía necesaria en este caso será g veces el magnetón de Bohr por la intensidad del campo. La tercera posibilidad es que la órbita cambie de tamaño en una unidad y que simultáneamente se invierta el spin. Por ejemplo, el electrón puede pasar del escalón de $n = 1$ de la escalera de spin abajo directamente al escalón de $n = 0$ de la escalera de spin arriba. Estos niveles casi coinciden; la energía necesaria para invertir el spin en la orientación antiparalela viene proporcionada, casi en su totalidad, por la energía liberada cuando la órbita se reduce en una unidad. Sólo hemos de suministrar la pequeña diferencia de energía entre estas cantidades. Es igual a $(g - 2)$ por el magnetón de Bohr y por la intensidad del campo.

La energía necesaria para estos cambios de estado se expresa convenientemente en términos de la frecuencia de la radiación electromagnética que induce la transición. Toda frecuencia puede convertirse en unidades de energía multiplicándola por la constante de Planck; para nuestros propósitos, empero, ni siquiera es necesario hacer la conversión. La propia frecuencia puede hacer el papel de la energía. La frecuencia necesaria para invertir el spin es proporcional a g, la constante que determina la diferencia de energía entre estados de spin. De la misma manera, la frecuencia de radiación que cambia el tamaño de la órbita de ciclotrón en una unidad es proporcional a 2, la constante que determina la separación entre escalones de una determinada escalera de energías. Para valores típicos del campo magnético aplicado, ambas frecuencias están en la región de microondas del espectro electromagnético. La diferencia entre ellas, que se llama la frecuencia anómala, induce la doble transición en la cual el spin y el diámetro orbital cambian a la vez. La frecuencia anómala es proporcional por tanto a $g - 2$. Como g es mayor que 2 sólo en un 0,1 por ciento, la frecuencia anómala será más pequeña que la frecuencia de transición ciclotrónica en un factor cercano a 1000.

Podemos indicar ahora el procedimiento de medir el factor g en términos de frecuencia de radiación. Deben determinarse dos cantidades: la frecuencia de transición ciclotrónica y la frecuencia anómala. Los valores concretos de ambas frecuencias dependen de la intensidad del campo magnético y del valor que se tome para el magnetón de Bohr, de manera que no pueden predecirse más allá de la exactitud con la que se conocen dichas cantidades. Sin embargo, en la razón de las dos frecuencias estos dos factores se cancelan y las únicas cantidades significativas que permanecen son las constantes de proporcionalidad que definen la separación de niveles en el diagrama de escalera. Para la frecuencia anómala la constante es $g - 2$ y para la frecuencia de transición ciclotrónica es exactamente 2. Por tanto, la razón de las dos frecuencias es igual a $(g - 2)/2$. Multiplicando por 2 y sumando 2 se obtiene el propio valor de la constante g.

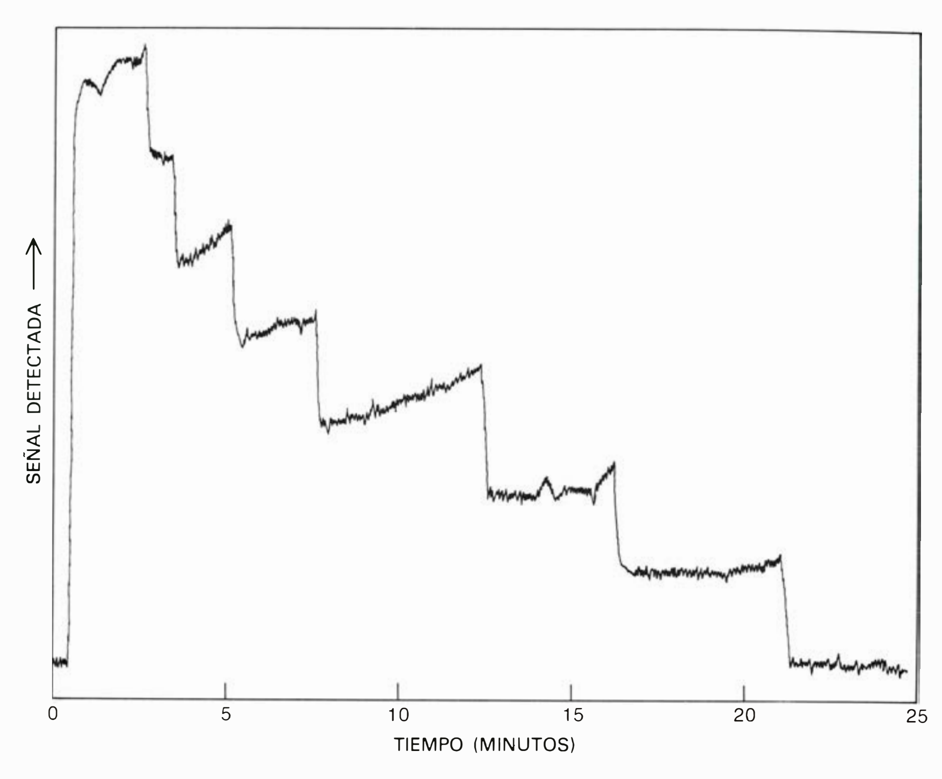
Esta forma de encontrar el factor g puede parecer innecesariamente indirecta. ¿Por qué no medir simplemente la frecuencia de transición de inversión de spin, que es directamente proporcional a g, y se tendría el valor deseado en un único paso? Una parte de la respuesta está en la sustancial ventaja que se tiene al trabajar con una razón adimensional. Supongamos que la frecuencia de cambio de spin se midiera con una exactitud de ocho cifras decimales. Para obtener el factor g, dicha frecuencia debería dividirse por el magnetón de Bohr y por la intensidad del campo magnético aplicado y multiplicarse por la constante de Planck. Las ocho cifras decimales sólo mantendrían su sentido si todos estos factores se conocieran al menos con la misma precisión. Al tomar la razón de dos frecuencias se eliminan todas las cantidades adicionales, de manera que la precisión del resultado viene determinada sólo por la exactitud de la medición de la frecuencia.

Hay otro argumento en favor del método indirecto. Como se sabe que g es muy próximo a 2, la obtención de g a partir de una medición de $g - 2$



CIRCUITO EQUIVALENTE que define una configuración de dispositivos elementales que reproducirían las propiedades eléctricas de la trampa. Para observar el movimiento del electrón, se aplica una señal de radiofrecuencia en la parte de arriba de la trampa y se detecta la parte transmitida al fondo. Cuando la trampa está vacía, los electrodos se hallan acoplados solamente por pequeñas capacitancias. La señal transmitida a través de estas capacitancias se cancela en la circuitería externa. Un electrón encerrado en la trampa produce el mismo efecto que una pequeña capacitancia y una gran inductancia conectando los electrodos de casquete. A través de estos elementos de circuito fantasma, una pequeña señal alcanza al detector. En realidad, la señal aplicada al electrodo de arriba dirige la oscilación axial del electrón, que induce una corriente de la misma frecuencia en el de abajo.

proporciona una gran mejora en la precisión. Si $(g - 2)/2$ se conoce con ocho cifras significativas, multiplicando por dos y sumando 2 se produce un valor de g con una precisión de 11 cifras significativas. Esta aparente paradoja de exactitud obtenida sin ningún precio puede explicarse de varias maneras. Una explicación es que la frecuencia anómala es 1000 veces más pequeña que la frecuencia de cambio de spin, de manera que una medición con una determinada exactitud produce una incertidumbre mucho menor en términos de ciclos por segundo. Otra explicación consiste en observar que, en cualquier medición de la frecuencia anómala, la separación de niveles de la órbita ciclotrónica, que vale exactamente 2, es sustraída por el propio sistema físico y no por el experimentador. En consecuencia, sólo hace falta medir la discrepancia con 2. La situación del experimentador es parecida a la de un controlador a quien se pide preparar una carrera de 1001 metros. La distancia puede medirse metro a metro, pero resulta más sencillo obtener una gran precisión con una cinta que se sepa que tiene exactamente un kilómetro de largo. Si se resta dicha distancia del total, sólo se tendría que medir un metro con gran precisión.



REGISTRO DE SIETE ELECTRONES confinados en la trampa. Se realizó detectando la corriente inducida por la oscilación axial. Se ajustó la señal aplicada a una amplitud cercana al máximo que los electrones podían tolerar. Como los electrones se escapaban uno a uno, se observaron siete reducciones en la corriente inducida. Con una amplitud menor, un electrón puede quedar confinado durante semanas.

El procedimiento adoptado en la Universidad de Washington para medir el factor g puede resumirse como sigue. Primero se captura un electrón en un campo magnético uniforme; se analiza su movimiento en el campo a fin de determinar dos cantidades: la frecuencia de la radiación aplicada que cambia de tamaño de la órbita y la frecuencia que induce un cambio simultáneo en el tamaño de la órbita y en la orientación de spin. A partir de la razón de estas dos frecuencias se puede encontrar g mediante operaciones aritméticas triviales. Este esquema establece realmente los principios del experimento, pero se parece a la famosa receta de cocinar elefantes que empieza: "tómese medio elefante...". La mayor parte del trabajo ha pasado al baúl de los recuerdos, y con él gran parte de la aventura.

Una laguna del experimento tal como se ha descrito hasta ahora es la de que el electrón no está atrapado tan sólo por el campo magnético. En un campo magnético uniforme, el electrón no puede trasladarse a través de las líneas de campo, pero no hay nada que evite que se desplace paralelamente al campo y que, por tanto, se escape. Hace falta algo que establezca los extremos de la trampa; en la Universidad de Washington elegimos un campo eléctrico superpuesto al campo magnético, en una configuración llamada trampa Penning.

El campo eléctrico está formado por diferencias de potencial aplicadas a tres electrodos, concretamente un casquete en cada extremo de la trampa y un anillo que la rodea por la mitad. Ambos casquetes reciben una carga eléctrica negativa y, positiva, el anillo. En la combinación resultante de campos eléctrico y magnético, el electrón queda confinado en tres dimensiones. Si se desplaza horizontalmente, el campo magnético lo desvía en una órbita circular. Si se mueve verticalmente, según las líneas de campo magnético, cuando se aproxima al casquete cargado negativamente es reflejado por el campo eléctrico.

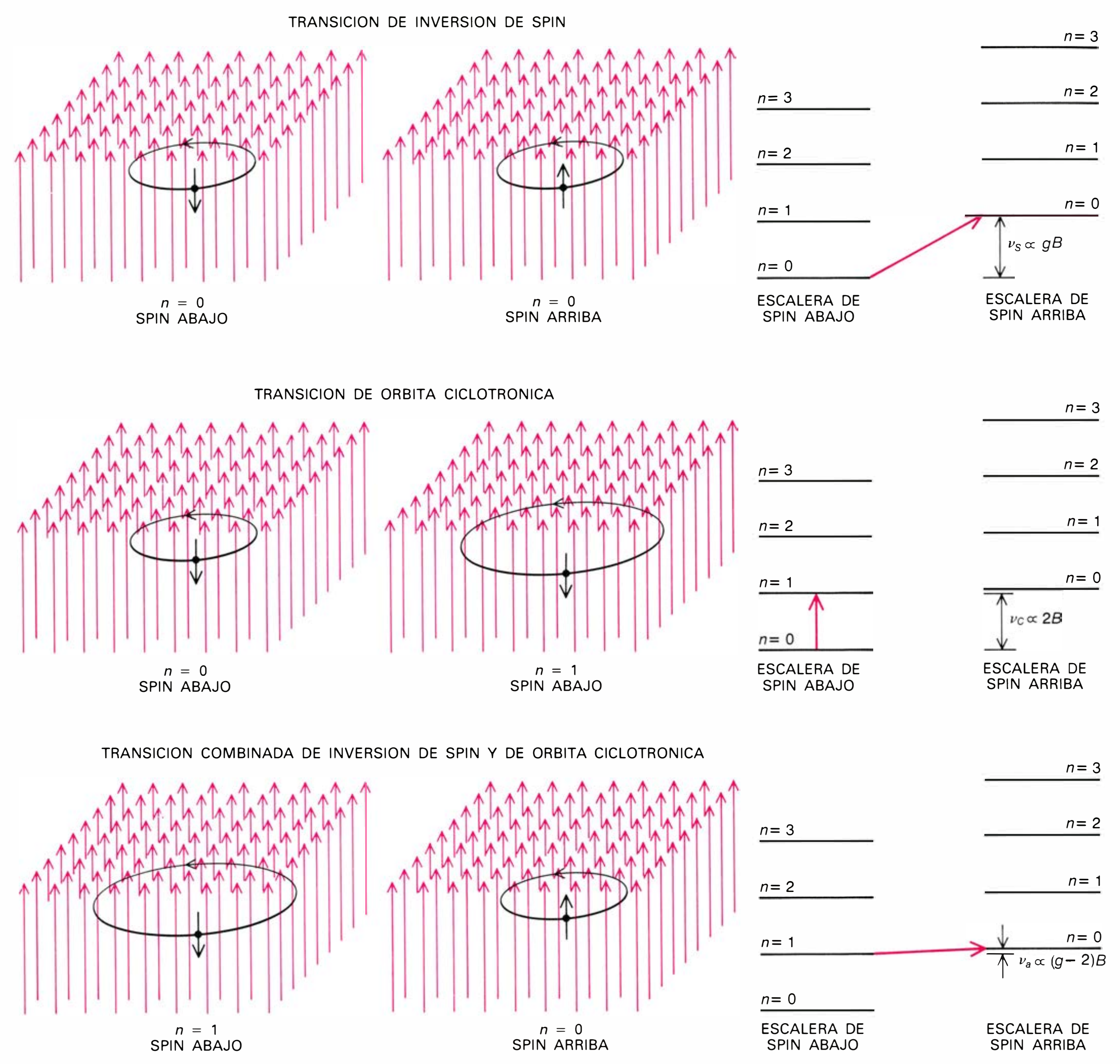
En general, un electrón reflejado por un electrodo de casquete superará el plano medio de la trampa y será repelido por el campo en el extremo opuesto de la trampa, superando de nuevo el plano medio. De esta manera puede surgir una oscilación a lo largo del eje de simetría de la trampa. Si la frecuencia de la oscilación tiene que ser independiente de la amplitud, los electrodos habrán de poseer cierta forma: ser hiperboloides de simetría cilíndrica alrededor del eje de la trampa.

La adición del campo eléctrico complica el movimiento de la partícula atrapada. El electrón sigue describiendo los rápidos círculos alrededor de las líneas del campo magnético que constituyen el movimiento de ciclotrón. Superpuesta a esta velocidad orbital existe ahora una oscilación axial paralela a las líneas del campo magnético. Además, la interacción de los campos eléctrico y magnético da lugar a un tercer modo de movimiento. El campo eléctrico no sólo suministra una fuerza recuperadora que confina al electrón a lo largo del eje de simetría, sino que también tiene una componente radial que tiende a empujar al electrón lejos del centro de la trampa y hacia el electrodo de anillo. Esta fuerza radial podría permitir que el electrón escapase, si no fuera por el campo magnético que lo compensa a través del mismo mecanismo que genera la rotación ciclotrónica. La fuerza radial que actúa sobre el electrón se convierte, por el campo magnético, en un desplazamiento circular; el electrón es desviado, pues, en una trayectoria circular.

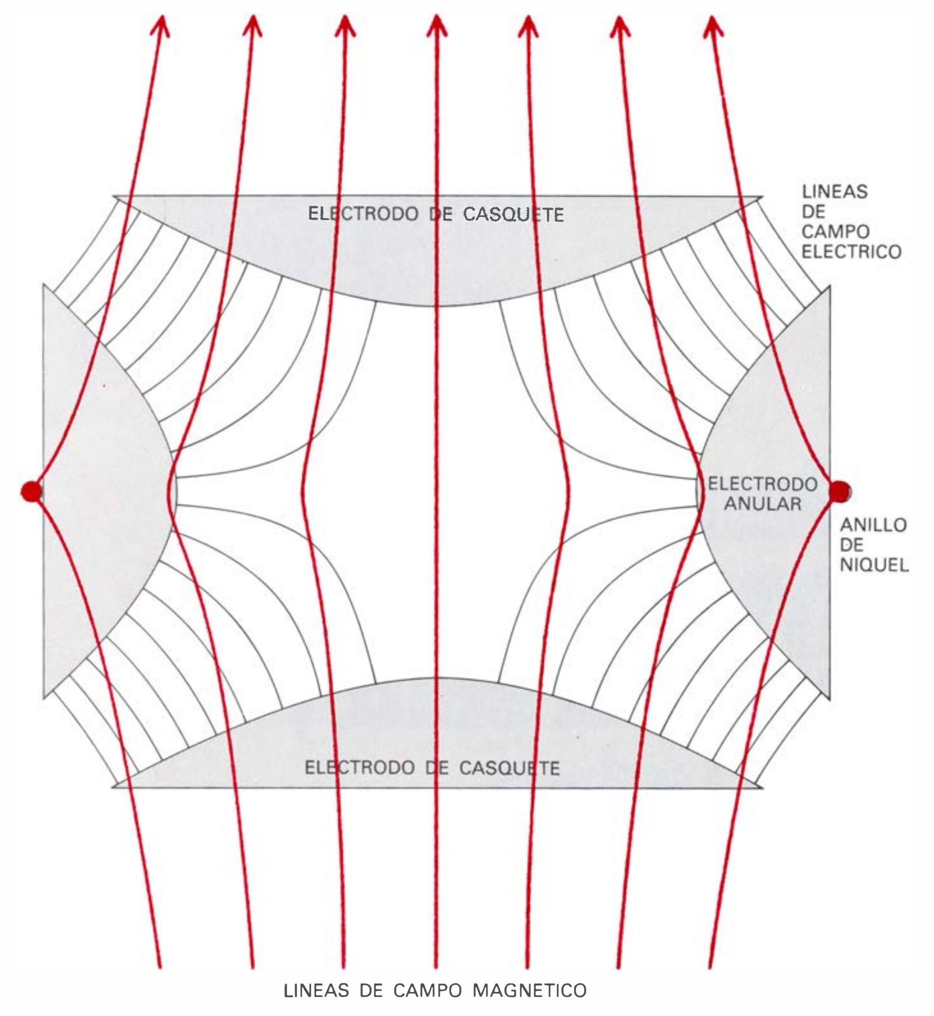
Esta última perturbación impuesta sobre la trayectoria del electrón se llama movimiento magnetrónico, en razón del instrumento de generación de microondas, donde desempeña un papel importante. La órbita magnetrónica es mucho mayor que la órbita de

ciclotrón, pero el electrón se mueve a su alrededor mucho más despacio. ("Grande" y "despacio" se pueden usar aquí sólo con propósitos de comparación. Típicamente, el electrón realiza unas 35.000 vueltas de magnetrón por segundo, pero en cada una de estas revoluciones hace 1,4 millones de órbitas ciclotrónicas.) El movimiento de magnetrón modifica ligeramente todos los estados energéticos del electrón, desplazando los niveles en el diagrama de escalera. Sin embargo, los desplazamientos son pequeños y pueden tanto calcularse como medirse experimentalmente. Por consiguiente, en una medición precisa del factor g es posible corregir los efectos del movimiento magnetrónico.

La trayectoria del electrón en la trampa Penning puede así analizarse en tres componentes. El electrón gira rápidamente en pequeños bucles (el movimiento de ciclotrón); el centro de cuyos bucles se desplaza lentamente alrededor de un círculo mayor (el movimiento de magnetrón). Al mismo tiempo, el electrón está vibrando en vaivén a lo largo del eje de la trampa, perpendicularmente al plano en el que yacen las órbitas ciclotrónica y magnetrónica. El movimiento total es análogo al de un carrusel de feria, donde una cabina pivota en un pequeño círculo sobre una plataforma giratoria que rota



ESTADOS ENERGETICOS DEL ELECTRON. Dependen del tamaño de la órbita del ciclotrón (dada por el valor del número cuántico *n*) y de la orientación del vector de spin de la partícula (designada por "abajo" o "arriba"). Para cada orientación de spin, hay una serie de niveles de energía, separados casi por igual, correspondientes a las distintas órbitas de ciclotrón. El diagrama de las dos series recuerda un par de escaleras, que están desplazadas verticalmente por algo más de un escalón. Los intervalos de energía entre estados son proporcionales a la intensidad del campo magnético aplicado (*B*); la constante de proporcionalidad es distinta para cada clase de transición entre estados. Si el electrón invierte su spin de abajo arriba, el cambio de energía es proporcional a *g*. Si el tamaño de la órbita ciclotrónica aumenta en una unidad, la energía necesaria es proporcional a 2. Una transición combinada, en la que el spin se invierte y la órbita ciclotrónica aumenta simultáneamente, necesita una cantidad de energía proporcional a la diferencia entre estos factores, es decir, *g*-2. Como el valor de la constante, el factor *g*, es cercano a 2, se trata de una cantidad de energía pequeña.



BOTELLA MAGNETICA creada en la trampa mediante un anillo de níquel (un metal ferromagnético), que distorsiona ligeramente el campo magnético uniforme impuesto. A causa del anillo, las líneas de campo se curvan hacia fuera en el plano medio y convergen efectivamente hacia los extremos de la trampa. Esta disminución gradual del campo contribuye con una fuerza de recuperación extra a la oscilación axial del electrón. La magnitud de la fuerza depende del tamaño de la órbita ciclotrónica y de la orientación del spin; y así, cambios en estas cantidades dan lugar a ligeros desplazamientos en la frecuencia de la oscilación axial. En virtud de este acoplamiento de los tres modos de movimiento, el estado energético del electrón puede determinarse controlando la frecuencia de la oscilación axial.

en un círculo mayor al tiempo que cabalga sobre una serie de ondulaciones.

¿En qué medida puede considerarse este sistema como un átomo, mereciendo el nombre de geonium? Se parece a un átomo principalmente porque el electrón está ligado a un campo de fuerzas como el de un núcleo atómico. El movimiento del electrón en este campo está cuantificado y las transiciones entre los distintos modos de movimiento corresponden a frecuencias de radiación definidas. En otras palabras, el electrón atrapado tiene un espectro, que puede estudiarse de la misma manera que se estudia un espectro atómico.

Se puede así crear muy bien un átomo artificial, pero si hemos de tomar el átomo para cualquier medición, deberá disponerse de un método de observar su espectro. Un átomo único no puede emitir o absorber gran cantidad de radiación; de hecho, la cantidad es tan pequeña que difícilmente puede detectarse, y mucho menos medirse con precisión. Existe, sin embargo, un método más práctico de observar el movimiento del electrón, cuyo secreto lo tiene la vibración axial, que induce pequeñas corrientes en los electrodos de la trampa. Las corrientes pueden detectarse en la circuitería a la que están conectados los electrodos.

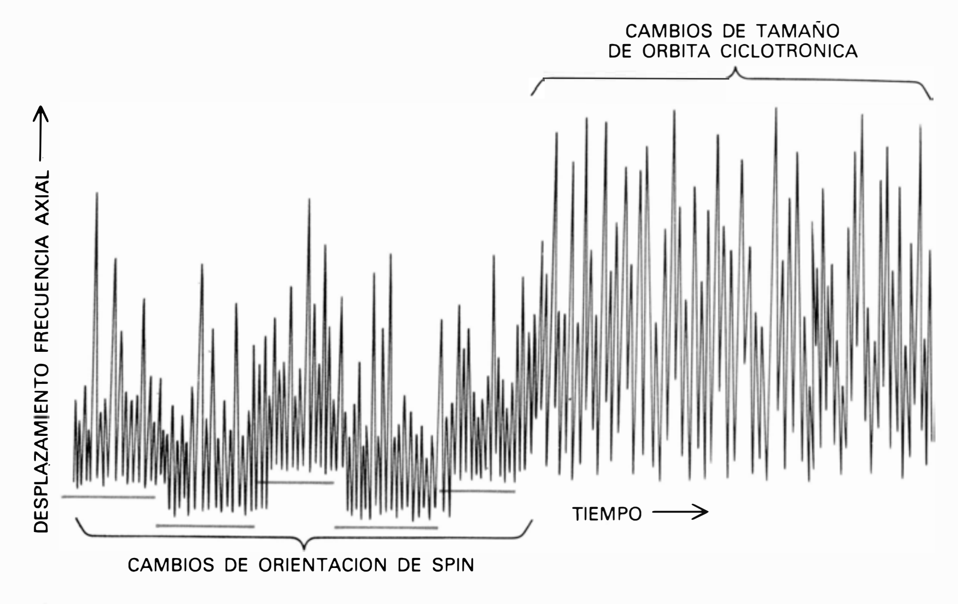
Las características eléctricas de la trampa Penning pueden analizarse en términos de un circuito equivalente: una red de dispositivos elementales, tales como resistencias, capacitancias e inductancias, que puede sustituir a la trampa y simular todas sus propiedades. En esta clase de análisis, la trampa se la supone como una caja negra cuyos mecanismos internos desconoce el experimentador; sólo ve tres terminales correspondientes a los dos electrodos de casquete y al electrodo anular.

Cuando la trampa está vacía, el circuito equivalente consiste en pequeñas capacitancias que conectan los tres electrodos. Si se aplica una señal de alta frecuencia a la parte de arriba de la trampa, a través del electrodo de casquete superior y del anillo se transmite un pequeño remanente de la señal hasta el fondo de la trampa mediante la capacitancia existente entre los electrodos de casquete. La señal transmitida puede detectarse mediante un receptor conectado entre el casquete inferior y el anillo.

La captura de un único electrón modifica dramáticamente el circuito equivalente. Cuando la trampa tiene un electrón actúa como si un circuito resonante, formado por una capacitancia y una gran inductancia, estuviese conectado en serie entre los dos electrodos de casquete. Aunque la contribución de estos elementos de circuito fantasma a la transmisión de la señal es más débil que la de la capacitancia de la trampa, la nueva trayectoria tiene propiedades características que permiten que la señal del electrón pueda aislarse y controlarse.

En condiciones de trabajo usuales, la inductancia del circuito equivalente que representa al electrón es de unos 10.000 henry, un valor que correspondería a un gran arrollamiento de alambre. No puede obtenerse, de ordinario, una inductancia tan grande en un circuito de alta frecuencia. No existe, desde luego, el arrollamiento de alambre; la inductancia simplemente refleja la pequeña inercia del electrón atrapado. Lo que sucede en realidad en el interior de la trampa es que el electrón responde a la señal de radiofrecuencia aplicada oscilando sincronizadamente con ella e induce por tanto una réplica de la señal en los electrodos de abajo. Existe un límite estricto sobre la potencia máxima que puede transmitirse de esta manera: si las oscilaciones del electrón se hacen demasiado grandes, la partícula llega a los electrodos y se pierde. Podríamos decir que el circuito resonante se quema con facilidad. Es necesario un receptor sensible para detectar incluso las mayores señales que el electrón atrapado puede manejar.

Conseguimos por primera vez una prueba clara de un electrón, único, atrapado al detectar las pequeñas co-



REGISTRO DEL DESPLAZAMIENTO DE LA FRECUENCIA de la oscilación axial. Produce un gráfico que recuerda un campo de hierba. Respondiendo a las fluctuaciones térmicas, el tamaño de la órbita de ciclotrón cambia continuamente, causando excursiones rápidas y aleatorias de la frecuencia axial; son las matas de hierba. Las inversiones de la orientación del spin son mucho menos frecuentes, y se observan como un cambio en el nivel de la raíz de la hierba. El factor *g* se determina irradiando el electrón con energía electromagnética y midiendo dos frecuencias: la frecuencia que provoca cambios en el tamaño de la órbita, y por tanto produce la hierba más alta, y la frecuencia que invierte el spin (con un cambio en el tamaño de la órbita), y por tanto da el máximo ritmo de cambios en el nivel de la raíz.

rrientes inducidas. Después de un bombeo a fin de obtener un buen vacío en la trampa, se introdujo en ella un pequeño número de electrones provinientes de un filamento caliente. Se aplicó un voltaje de radiofrecuencia en la parte de arriba de la trampa, y se le ajustó a una amplitud cerca del máximo que los electrones podían soportar. Se controló luego la señal que llegaba al fondo de la trampa. Varios minutos después, la salida disminuyó un poco, para estabilizarse durante unos cuantos minutos más y volver a disminuir de nuevo. Durante el transcurso de una media hora se produjeron siete reducciones en el tamaño de la señal recibida, todas aproximadamente iguales; tras la última reducción, la señal volvió al nivel de fondo característico de la trampa vacía. Lo que estábamos observando era, desde luego, la pérdida de electrones individuales a partir de la población de siete, que evidentemente habían llenado la trampa al principio. En experimentos posteriores descubrimos que, si se reducía el potencial aplicado cuando sólo quedaba un electrón, éste permanecía en la trampa y podía observarse a lo largo de muchas semanas.

El confinamiento permanente de un único electrón fue un resultado excitante y muy satisfactorio, pero se trataba sólo del primer paso hacia la medición del espectro del geonium y, por tanto, hacia la medición de *g*. Fueron necesarias unas cuantas mejoras en el aparato antes de que pudieran emprenderse medidas de precisión. Van Dyck y Schwinberg se unieron a nosotros para realizar algunos de estos cambios y, más tarde, se hicieron cargo del proyecto.

La geometría del campo eléctrico resultó ser esencial, y, a fin de obtener un mejor control sobre él, se construyó una nueva trampa con cinco electrodos en vez de tres. Los dos nuevos elementos, que son anillos situados en los intervalos existentes entre los electrodos de casquete y el de anillo original, permiten compensar electrónicamente pequeños defectos del campo. El filamento caliente, que tendía a estropear el vacío cuando se cargaba un nuevo grupo de electrones, se sustituyó por un punto de emisión de campo. Todo el aparato fue diseñado de nuevo a fin de que pudiera insertarse en la cavidad de un potente imán superconductor. El imán tenía que enfriarse con helio líquido, y se utilizaba un baño de helio separado para enfriar la trampa hasta cuatro grados Kelvin. El frío reducía las fluctuaciones térmicas en el movimiento del electrón y ayudaba a mantener un alto vacío. Estos detalles prácticos, cuya enumeración puede parecer ordinaria, absorbieron gran parte de los varios años de esfuerzo que se emplearon en el proyecto.

Hubo que introducir una modifica-

ción de naturaleza fundamental: en el aparato inicial no había medio de detectar cambios en el tamaño de la órbita ciclotrónica o en la orientación del spin. Las frecuencias a las cuales estos cambios tenían lugar era lo que queríamos determinar. Sólo se podía observar fácilmente la frecuencia de la oscilación axial, y, en un campo magnético uniforme, dicha frecuencia viene a ser independiente de la órbita ciclotrónica y de la dirección del spin. La solución que al final adoptamos consistió en diseñar un medio de acoplamiento de la frecuencia axial con la energía del electrón.

Se consiguió el acoplamiento insertando un anillo de níquel (un metal ferromagnético) en el plano medio de la trampa, rodeando el electrodo anular original. El anillo de níquel tenía el efecto de curvar el campo magnético en el plano medio, de suerte que fuese algo más intenso cerca de los extremos de la trampa; la configuración resultante se llama una botella magnética. Si no hubiera oscilación axial, y el electrón permaneciera en el plano medio, la botella magnética no tendría ningún efecto. Sin embargo, en cada excursión fuera del plano medio, la ligera convergencia de las líneas del campo magnético tiende a reforzar el efecto del campo eléctrico empujando de nuevo el electrón hacia el plano central. Como resultado de esta fuerza de recuperación adicional aumenta la frecuencia de las oscilaciones axiales.

La intensidad total de la interacción entre el electrón y el campo magnético distorsionado depende de la energía de la órbita ciclotrónica y de la orientación del spin. La influencia del campo es mayor cuando la órbita es más grande o cuando el spin está hacia arriba. Por esta razón, el valor de la frecuencia axial cambia con cada variación en el tamaño de la órbita ciclotrónica o en el estado de spin. La distorsión del campo magnético debe mantenerse pequeña a fin de que los niveles energéticos que se analizan no se modifiquen demasiado, pero sólo hace falta un pequeño desplazamiento de la frecuencia axial para que sean detectables los cambios en el estado cuántico. Típicamente, la oscilación axial tiene una frecuencia de unos 60 megahertz; el desplazamiento en la frecuencia debido a la botella magnética es de unos pocos hertz.

En un experimento ideal, el electrón mantendría un movimiento estacionario en una cierta órbita ciclotrónica y una determinada orientación de spin hasta que el experimentador suministrara la energía necesaria para cambiar el estado. Una gráfica de la energía del electrón en función del tiempo mostraría, por tanto, una serie de saltos determinados, todos acaecidos bajo el control del experimentador, y sería plana entre dos saltos. Pero el experimento real difiere bastante. Incluso a cuatro grados Kelvin, la agitación térmica del electrón tiene una energía media equivalente a unos pocos peldaños de la escalera de estados ciclotrónicos. Debido a estas perturbaciones térmicas aleatorias, el electrón se está moviendo constantemente arriba y abajo en cualquiera de las escaleras en que esté. El gráfico resultante de la energía en función del tiempo se parece a un campo de hierba: el nivel de las raíces corresponde al peldaño más bajo de la escalera y las hojas de hierba son excursiones energéticas a escalones superiores. Cualquier medida de los niveles energéticos debe hacerse sobre este fondo de ruido térmico.

Para realizar la medición, se buscan cuidadosamente las frecuencias que producen el cambio máximo en el panorama rápidamente fluctuante. Primero se suministra una señal de frecuencia cercana a la frecuencia de radiación ciclotrónica y se controla la altura media de la "hierba". Se varía entonces lentamente la señal aplicada en un estrecho intervalo de frecuencias. Cuando la frecuencia corresponde exactamente al intervalo entre escalones, el electrón absorbe energía fuertemente y sube, al menos, varios peldaños. Así, la frecuencia de radiación ciclotrónica es la frecuencia que proporciona la hierba más alta.

En la medida de la frecuencia anómala, el fondo de ruido térmico es menos perturbador. La transición que se debe observar en este caso es compuesta (tanto el spin como la órbita deben cambiar), y resulta mucho menos probable que suceda espontáneamente. En general, el spin no cambia a menos que el experimentador haga algo que provoque la inversión, y así todas las transiciones térmicas del electrón se limitan normalmente a una sola de las escaleras del diagrama energético. Para inducir la transición lateral entre escaleras debe suministrarse una señal fuerte, señal cuya intensidad ha de variar a través de la órbita del electrón.

¿Cómo logra saber el experimentador la orientación del spin en un momento dado, o en otras palabras,

$$\nu_s = \frac{g\mu_B B}{h} \qquad \nu_c = \frac{2\mu_B B}{h} \qquad \nu_a = \nu_s - \nu_c = g\mu_B B - 2\mu_B B = (g-2)\mu_B B$$

$$\frac{\nu_a}{\nu_c} = \frac{\frac{(g-2)\mu_B B}{h}}{\frac{2\mu_B B}{h}} = \frac{(g-2)}{2}$$

$$\frac{(g-2)}{2} = 1.1596522 \times 10^{-3} \text{ (OCHO CIFRAS SIGNIFICATIVAS)}$$

$$g = 2\left[\frac{(g-2)}{2}\right] + 2 = 2.0023193044 \text{ (11 CIFRAS SIGNIFICATIVAS)}$$

CALCULO DEL FACTOR *g*. Se inicia con los valores medidos de la frecuencia de transición ciclotrónica (ν_c) y de la frecuencia anómala (ν_a), que es igual a la diferencia entre la frecuencia de inversión de spin (ν_s) y ν_c. Ambas frecuencias dependen del magnetón de Bohr (μ_B) y de la intensidad del campo magnético impuesto (*B*); la constante de Planck (*h*) también entra en la ecuación. En el cociente de ν_a a ν_c, estas cantidades se cancelan exactamente; lo que permanece es la razón (*g*-2)/2. Multiplicando por 2 y sumando 2 se obtiene *g*; además, si la razón se mide con una exactitud de ocho cifras significativas, el valor de *g* puede determinarse con 11 cifras (con un error de menos de una unidad en el último decimal).

cómo sabe en qué escalera está el electrón? La información necesaria puede encontrarse en el propio diagrama de energías: la escalera de spin abajo, recordemos, se extiende aproximadamente todo un escalón más abajo que la escalera de spin arriba. El nivel de la raíz de la hierba está, por tanto, a una energía menor cuando el spin está hacia abajo. La frecuencia anómala es la frecuencia que cambia más a menudo el nivel de la raíz.

Una vez medidas la frecuencia de transición ciclotrónica y la frecuencia anómala, sólo falta dividir, multiplicar por 2 y sumar 2 a fin de calcular *g*. Las dos frecuencias pueden determinarse con precisión, incluso en un fondo ruidoso, porque ambas resonancias son muy estrechas, es decir, un pequeño cambio en la frecuencia aplicada provoca un gran cambio en el ritmo con que se observan las transiciones. El instrumento con el que se generan las frecuencias se basa finalmente en un reloj atómico de cesio, pero ni siquiera la calibración absoluta del instrumento limita la exactitud de la medición. Como ambas frecuencias son generadas por el mismo instrumento y sólo importa su razón, tan sólo la precisión relativa en el intervalo de frecuencias empleado contribuye a la incertidumbre.

Nosotros habíamos abandonado el equipo del proyecto del geonium cuando el aparato estuvo preparado para mediciones de precisión. Supimos acerca de los primeros resultados por una llamada telefónica de Van Dyck. Poco después de que detectara por primera vez transiciones en la frecuencia anómala, pudo anunciar un resultado mejorado para el factor *g*, y desde entonces ha refinado la técnica obteniendo una precisión de 10 cifras decimales. El mejor valor de *g* es ahora 2,0023193044, con un error probable de menos de una unidad en el último decimal. Mediante nuevos refinamientos del método se lograrán nuevas mejoras en precisión. El valor teórico, calculado según la prescripción de la electrodinámica cuántica, está en un acuerdo exacto y tiene aproximadamente la misma indeterminación.

El valor de *g* citado antes es una media de medidas hechas con varios electrones estadísticamente sopesada, pero los resultados separados por electrones individuales también están de acuerdo hasta menos de una unidad en la última cifra decimal. Aunque no sea nada espectacular hallar acuerdo entre un electrón y el siguiente, tampoco debe considerarse como una cosa trivial.

En la esencia de la idea de una partícula elemental de materia se encuentra la hipótesis de que todas las partículas del mismo nombre son perfectamente idénticas. En este artículo hemos hablado repetidamente "del electrón", significando un arquetipo que se reproduce en innumerables copias idénticas en todas las partes del universo. Basándose en la hipótesis de que todas las copias son idénticas, el experimentador realiza mediciones con cualquier electrón que encuentra a su alcance en el laboratorio, o con cualquier colección de ellos, y relata sus resultados como información acerca de las propiedades "del electrón". Alguien puede considerar presuntuosa esta manera de actuar; de todas maneras no hace ningún daño el comprobar su validez. Aunque existen muchas pruebas indirectas que sugieren que todos los electrones son idénticos, el geonium ofrece una oportunidad, entre pocas, de llevar a cabo una prueba directa.

El siguiente paso hacia la medición del factor *g* del electrón es, lógicamente, medir el correspondiente número para el positrón, la antipartícula del electrón cargada positivamente. Anteriores investigaciones del factor *g* del positrón realizadas por Rich y sus colegas de Michigan habían presentado el inconveniente de que los positrones son mucho menos abundantes que los electrones. Con los métodos desarrollados en la Universidad de Washington, la medición podía haberse realizado, al menos en principio, con un único positrón, que quedaría atrapado para formar un único átomo de antigeonium. No se trata de que el experimento no presente dificultades: los positrones son emitidos con alta energía en la desintegración radiactiva de ciertos núcleos, y deben ser frenados e instalados en una trampa sin que les salga al encuentro ni siquiera un solo electrón ordinario, pues de lo contrario el electrón y el positrón se aniquilarían entre sí. Sin embargo, estos problemas han sido resueltos por Schwinberg. El factor *g* del positrón se espera que sea exactamente igual al del electrón. Pronto esta esperanza obtendrá una prueba experimental rigurosa.

Las técnicas empleadas para el estudio del geonium pueden aplicarse también para medir propiedades distintas del factor *g*, y con partículas distintas del electrón y el positrón. Por ejemplo, la trampa Penning compensada podría funcionar como un espectrómetro de masas de alta resolución, un instrumento que determina la relación de la carga a la masa de una partícula. Por este método, Van Dyck está ahora intentando una medición mejorada de la razón de la masa del electrón a la masa del protón. Dehmelt ha sugerido que un único ion pesado confinado en una trampa en miniatura podría servir de patrón de frecuencias ópticas que estaría libre de ciertos defectos comunes a los patrones actuales. Con esta idea, Dehmelt y W. Neuhauser, M. Hohenstatt y P. E. Toschek, de la Universidad de Heidelberg, han aislado e incluso fotografiado un único ion de bario en una trampa similar a la trampa Penning. Objetivo común de todos estos intentos es ver los elementos más sencillos de la naturaleza en su entorno más simple, donde es mayor la esperanza de comprenderlos.

Antecedentes de la civilización del valle del Indo

Una de las tres civilizaciones más antiguas fue la del Indo. Las excavaciones realizadas en Mehrgarh, en Paquistán, han descubierto poblados de labriegos que florecieron allí 3000 años antes que en Mohenjo-Daro y en Harappa

Jean-François Jarrige y Richard H. Meadow

Las civilizaciones más antiguas del Viejo Mundo surgieron en los valles de ciertos ríos: el del Tigris y Eufrates en Asia occidental, el del Nilo en el norte de Africa y el del Indo en el sur de Asia. De estas tres civilizaciones, la del Indo es la menos conocida. Este es el caso, aun cuando dos de sus ciudades, Mohenjo-Daro en el sur y Harappa en el norte, fueron de las mayores del tercer milenio a.C. y sus pueblos y aldeas se extendieron desde el Golfo Arábigo hasta las márgenes del Amu Darya, en el norte de Afganistán. A decir verdad, hasta la década de 1970 era un enigma el saber cómo había comenzado la civilización del Indo.

Ahora, seis campañas de trabajo en la región de Beluchistán, en el Paquistán central, han descubierto una serie de poblados agrícolas que empezaron a formarse más de tres mil años antes que Mohenjo-Daro y Harappa. El descubrimiento es significativo porque se creía que hasta entonces la región no daba señales de haber estado habitada por agricultores sedentarios durante una larga etapa. La falta de indicios en este sentido llegó a inducir a Sir Mortimer Wheeler, uno de los principales estudiosos de la civilización del Indo, a suponer que el surgir de la civilización había sido el resultado de la difusión hacia un área atrasada de una "idea" que estaba "en el aire" desde que las ciudades situadas más al oeste de Asia comenzaron a florecer.

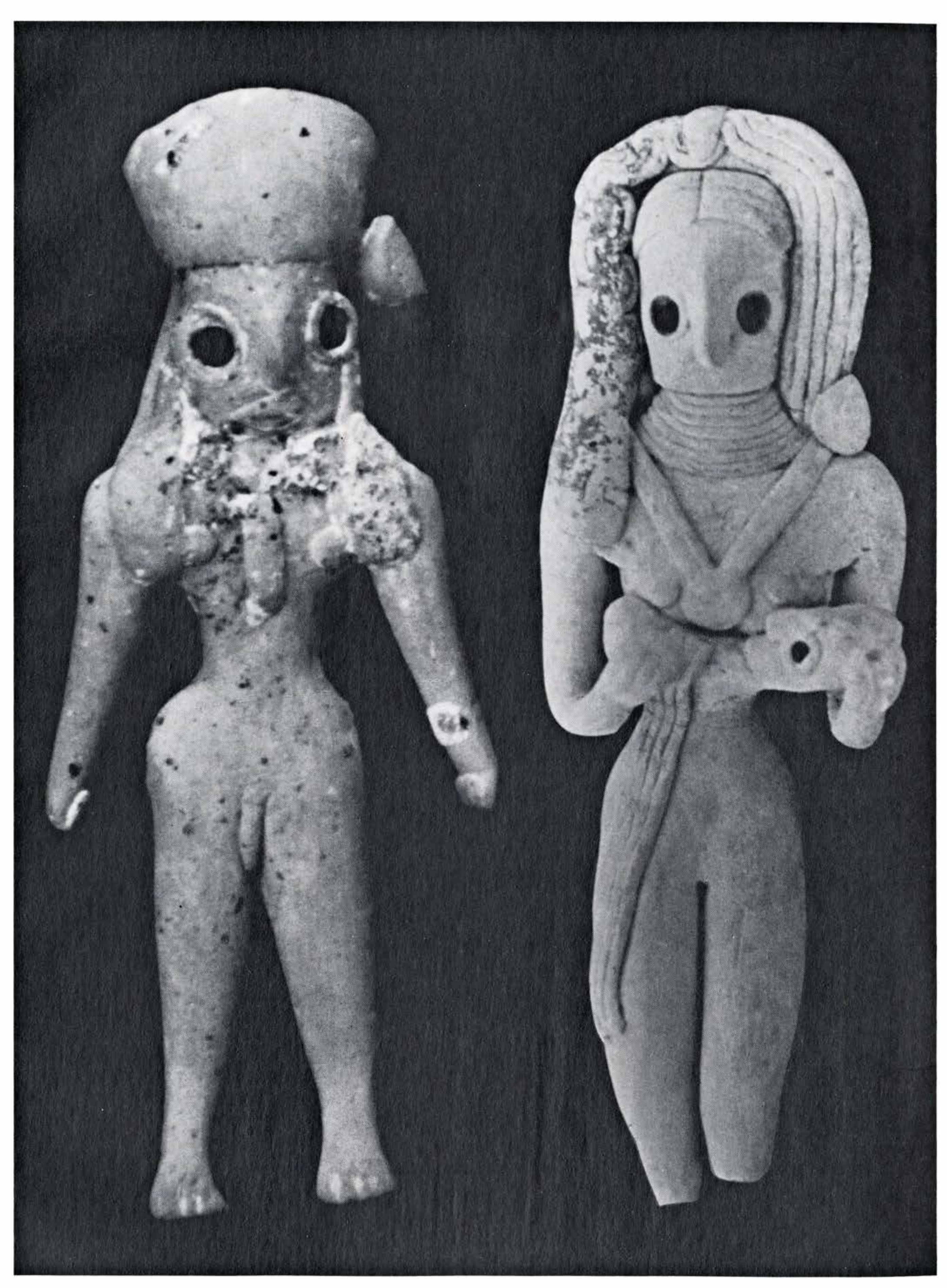
Las excavaciones se están realizando en el yacimiento de Mehrgarh, junto al río Bolán, por la Misión Arqueológica Francesa en Paquistán y por el Departamento Paquistaní de Arqueología. Esos trabajos nos permiten ver ahora que los esquemas sociales y económicos característicos de la civilización del Indo tenían profundas raíces a principios de la prehistoria de la región. El yacimiento se encuentra al pie del Paso de Bolán, una de las dos vías de comunicación más famosas entre el valle del Indo y la meseta del Irán. Aquí, la llanura de Kachi, una extensión casi llana de acarreo aluvial, se inclina suavemente hacia el sudeste en un trecho de más de 200 kilómetros hasta el río Indo. Así, aunque la zona forma parte del distrito administrativo de Beluchistán, se halla dentro del sistema de la cuenca del Indo.

Al iniciar la exploración de la zona de Mehrgarh en 1973, descubrimos una loma pequeña que resultó contener los restos de poblados que se remontaban al tercer y cuarto milenios a.C. Tras empezar las excavaciones activas en diciembre de 1974, se descubrió que la loma sólo era la parte más ostensible de un conglomerado mucho mayor de yacimientos que se extendía hasta el río Bolán, a casi un kilómetro al norte, y cubría una zona de más de 200 hectáreas. El conglomerado no representaba el detritus de ocupación de un solo y gran poblado. Más bien estaba compuesto de muchos poblados más pequeños, establecido cada uno de ellos después del total o parcial abandono de algún predecesor. En el curso de 3000 o 4000 años, los restos de estos poblados sucesivos llegaron a cubrir toda la zona.

Después de una crecida a comienzos de este siglo, el río Bolán desvió su curso hacia el oeste y comenzó a discurrir por un nuevo cauce situado a unos kilómetros de distancia del antiguo. Al hacerlo así, traspasó lo que ha resultado ser la parte más antigua del yacimiento. La garganta peñascosa producida por el nuevo cauce puso al descubierto unos 10 metros de edificios neolíticos superpuestos que habían sido sepultados casi por completo por los depósitos aluviales. Monique Lechevalier, del Centro Nacional de Investigación Científica (CNRS) de Francia, ha emprendido la excavación de esta parte del yacimiento, una zona que hemos rotulado MR. 3. Cuatro campañas de trabajo han puesto de manifiesto que la zona estuvo ocupada por poblados permanentes de colonos correspondientes al período neolítico inicial, cuando la cerámica era aún desconocida. El más reciente de una serie de edificios de adobe encontrados en este lugar ha sido datado por el carbono 14 en el sexto milenio a.C.

Se han excavado más de 700 metros cuadrados de los niveles superiores neolíticos de MR. 3, poniendo al descubierto la planta de la última aldea de labriegos del yacimiento. El poblado se componía de unidades de habitación de adobe, con estancias múltiples rectangulares, separadas unas de otras por espacios libres que contenían numerosos enterramientos humanos. Algunos de los edificios estaban divididos en pequeños compartimentos cuadrados, empleados al parecer como almacenes. Entre los utensilios se encuentran piedras de moler y cuchillas pequeñas de pedernal, que muestran el brillo característico del pedernal usado para segar cereales. Esta prueba indirecta que sugiere faenas agrícolas se halla reforzada más directamente por las improntas de varios granos de cereales en el barro acumulado.

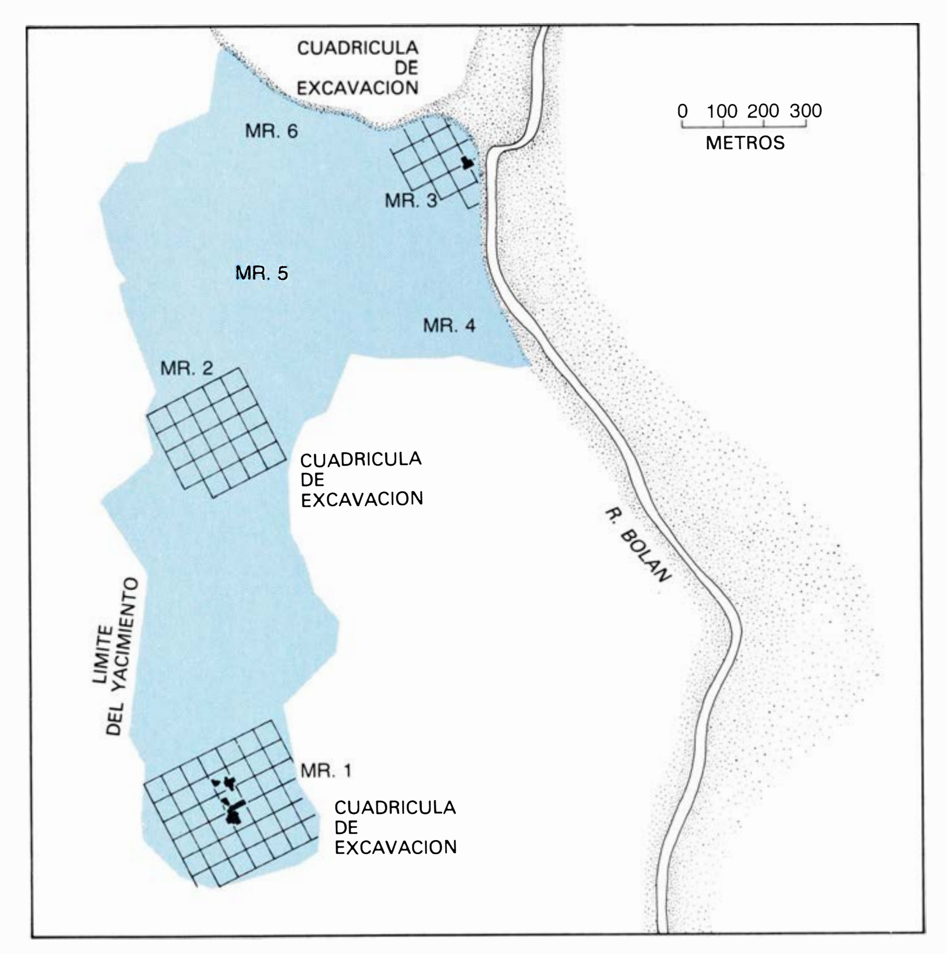
A partir de estas improntas, Lorenzo Costantini, del Museo Nacional de Arte Oriental de Roma, que está estudiando los restos de flora de Mehrgarh, ha podido identificar varias clases distintas de cereales. Comprenden éstas la



ESTATUILLAS DE TERRACOTA de un hombre y de una mujer halladas en Mehrgarh. Miden unos 12 cm de altura. El hombre lleva un turbante. El cabello de la mujer ostenta un complejo tocado. Proceden de niveles datados en 2600 a.C., cuando las figuras masculinas hacen su aparición.



YACIMIENTO DE MEHRGARH, a la orilla del río Bolán; se halla cerca del margen occidental de la llanura del Indo, en la región de Beluchistán del Paquistán central. El mapa muestra las dos ciudades principales de la civilización del Indo, Mohenjo-Daro y Harappa, y otros yacimientos arqueológicos.



EXTENSION TOTAL DEL YACIMIENTO, de más de 200 hectáreas. Dicha superficie está dividida en seis zonas. La zona más antigua, MR. 3, tiene un sedimento de diez metros, compuesto de restos sucesivos de edificios de adobe. Los niveles superiores de las aldeas del Período I excavadas aquí tienen 7000 años de antigüedad, según las dataciones del carbono 14. La fecha de los niveles inferiores del Período I aún no es segura. Los restos más recientes, al sur de MR. 1, son de un cementerio; tienen unos 4000 años.

cebada de dos carreras o cebada dística (*Hordeum distichum*), la cebada de cuatro carreras (*H. vulgare* y *H. vulgare* var. *nudum*), la escanda (*Triticum monococcum*), la espelta (*T. dicoccum*) y el trigo candeal (*T. durum* o *T. aestivum*). Estas identificaciones indican que Beluchistán fue un centro muy precoz en el cultivo de cereales.

Esta apreciación se ha visto muy reforzada por los resultados de un sondeo en profundidad verificado este año y que ha descendido hasta el subsuelo estéril situado por debajo del horizonte MR. 3. A unos siete metros bajo la superficie de los estratos del Neolítico precerámico se encontraron nuevas improntas de cebada de seis carreras, espelta, escanda y trigo candeal. No hemos podido todavía obtener datos del carbono 14 sobre la edad de estos niveles inferiores, pero podemos suponer que la acumulación de algo así como diez metros de restos encima de ellos no fue rápida. Por cuya razón hemos situado provisionalmente los comienzos del poblado neolítico precerámico en un momento anterior al 6000 a.C. A la totalidad del horizonte MR. 3 le hemos dado la designación cronológica de Período de Mehrgarh I.

Costantini ha identificado también los restos de otras plantas, además de los cereales, en los depósitos del Período I. Semillas carbonizadas de esa especie de ciruela que es la azufaifa (*Zizyphus jujuba*) y pepitas de dátiles (*Phoenix dactylifera*) han venido a demostrar que ambos árboles proporcionaban medios alimenticios en época neolítica. Aún hay cantidad de ellos en la zona de Mehrgarh en el día de hoy.

Los restos de animales son otra importante fuente de información para conocer el desarrollo de la agricultura en Mehrgarh. A lo largo de los dos metros superiores del yacimiento neolítico hay un sensible desplazamiento de los conjuntos faunísticos dominados por los huesos de animales salvajes hacia conjuntos caracterizados casi exclusivamente por los huesos de animales domésticos. Por ejemplo, en los conjuntos más antiguos los restos de gacelas (*Gazella dorcas*), carnero salvaje (*Ovis orientalis*), cabra montés (*Capra aegagrus*), ciervo de pantano (*Cervus duvauceli*), antílope grande (*Boselaphus tragocamelus*) y res brava (*Bos*, quizá de la especie *nomadicus*) sobrepasan con mucho los restos de vacuno verosimilmente domesticado (*Bos*, quizá de la especie *indicus*) y de cabra (*Capra hircus*). A finales del Periodo I, aunque todavía aparecen algunos restos de gacelas, cerdos sal-

EDIFICIOS DE ADOBE de los niveles superiores del área MR. 3; son de forma rectangular y encierran varias habitaciones. Estaban separados por zonas descubiertas que a menudo contenían sepulturas humanas. Se aprecia una tumba a la derecha de la vara del metro cuadriculado próxima al centro.

CERAMICA DEL PERIODO VII, hallada en el área de MR. 1. Este almacén contenía 200 vasijas intactas. Los habitantes del Mehrgarh comenzaron a producir en serie la cerámica en el Período III, hace 5700 años. En el Período VII, 1100 años más tarde, las cerámicas de Mehrgarh se exportaban al Irán.

vajes (*Sus scrofa*) y onagros (*Equus hemionus*), casi todos los demás restos de animales corresponden a reses, cabras y ovejas (*Ovis aries*) domesticadas. Puesto que en esta parte de Beluchistan había, en el sexto milenio a.C., vacuno, cabras y ovejas salvajes, es posible que los habitantes neolíticos de Mehrgarh hubiesen domesticado estas tres especies animales. Por lo menos en el caso de las ovejas hay buenas pruebas de la existencia de un proceso de domesticación local.

Si al conjunto faunístico más antiguo se le puede atribuir una edad de alrededor del 6000 a.C., la presencia de algún vacuno pequeño y presumiblemente domesticado (*Bos indicus*) en estos conjuntos indicaría que la cría de ganado comenzó en Mehrgarh tan pronto como lo hizo en Asia occidental. Además, han aparecido una serie de huesos del búfalo de agua (*Bubalus bubalis*) en los conjuntos neolíticos. Estos huesos proporcionan la prueba más primitiva de la presencia de este animal en el emplazamiento de una aldea en parte alguna de Asia fuera de China oriental. Por tanto, en el Período I de Mehrgarh vemos repetirse el proceso conocido en Asia occidental: los cazadores de una extensa variedad de animales salvajes se transforman en los pastores de unos cuantos animales selectos y domesticados. En Mehrgarh, sin embargo, el esquema ofrece una variante significativa: los animales domesticados más importantes no son las ovejas ni las cabras, sino el vacuno.



DECORACION GEOMETRICA de un vaso polícromo, típico de la cerámica del Período IV de Mehrgarh (hace 5500 años). En aquella época ya no se empleaban los motivos animales del Período III.

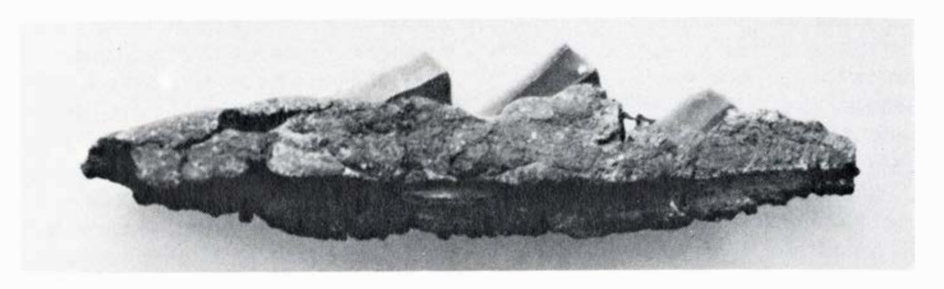
En las tumbas diseminadas a través del poblado, los colonos, pastores y cazadores del Período I depositaron los huesos de sus difuntos. En los niveles más antiguos, los cuerpos eran sepultados tanto en posición flexionada (con las rodillas recogidas sobre el pecho) como extendida y recubiertos de ocre rojo. Los ajuares comprenden collares de cuentas, ajorcas y cinturones. Las cuentas eran de concha, de hueso, de varias piedras de la localidad y de turquesa importada. A veces se incluía una cesta revestida de brea; es de suponer que cuando la colocaban al lado del muerto la habían llenado de artículos perecederos.

Gonzague Quivron, de la Misión Arqueológica Francesa, ha desenterrado pacientemente más de 30 tumbas del nivel superior de MR. 3. Cada tumba estaba limitada a un lado por una pared o plataforma de adobe. Aquí los artículos colocados en las tumbas incluyen hachas de piedra pulimentada, hojas y cuchillas geométricas de sílex, vasos de piedra, pastillas de ocre rojo y adornos personales, como sartas de cuentas. Muchas de las cuentas de estas tumbas son de turquesa importada y algunas de lapislázuli, importado también. El metal está asimismo presente: cerca de uno de los huesos inferiores de la pierna de un niño, Quivron exhumó una esporádica cuenta de cobre cilíndrica.

Los utensilios más abundantes del Período I son las piezas de sílex: hasta ahora han aparecido más de 20.000. Los utensilios son representativos de una industria en que predominaban las hojas. En la mayoría de ellas se habían hecho saltar lascas menudas por un filo o por los dos filos. Las cuchillas de sílex de forma geométrica representan algo menos del 4 por ciento del total. Entre ellas, sin embargo, hay cierta cantidad de "trapecios", triángulos sin un vértice. Habían sido retocadas de modo que

las cuchillas terminadas tuviesen un dorso cóncavo; son comparables directamente con los trapecios de dorso cóncavo hallados al oeste de Asia central. Se ha recuperado también una buena cantidad de instrumentos de hueso; la mayoría de ellos son leznas.

Como hallazgos excepcionales del Período I hay que señalar cinco estatuillas hechas de arcilla sin cocer. Tres representan seres humanos, y dos, animales. Una de las estatuillas humanas tiene forma cónica y lleva un collar de rombos de arcilla adheridos. La segunda está en posición sedente y tiene dos agujeros representando los ojos. De la tercera figura humana sólo se conserva la parte inferior; también ésta se halla sentada, con las piernas y los pies juntos. Estilísticamente, las tres recuerdan a las figuritas humanas primitivas del Irán occidental. Las dos estatuillas de animales tienen tan sólo una forma muy generalizada. Sin embargo, tanto ellas como las representaciones humanas son las estatuillas más primitivas descubiertas hasta ahora en el sur de Asia.



CUCHILLAS DE SILEX, incrustadas en ángulo en brea, para emplearlas como una hoz. La brea se introducía en la ranura de un mango de madera que ha desaparecido en los más de 6000 años que estuvo enterrado. Dos de estas hoces se encontraron en un almacén de granos en el área MR. 4 (Período II).

Inmediatamente al sur de MR. 3, descubrimos señales de una ocupación calcolítica que se remontaba al quinto milenio a.C. (El Calcolítico es una fase del desarrollo del Viejo Mundo comprendida entre el Neolítico y la Edad de Bronce.) Hemos designado la zona con la sigla MR. 4, y esta fase de la ocupación del yacimiento con el nombre de Período II. Aquí, los restos, situados inmediatamente por debajo de la superficie, incluyen cerámica. La excavación ha puesto al descubierto varios edificios rectangulares que están subdivididos en compartimentos estrechos y sin puertas. En el relleno de los compartimentos de uno de los edificios se encontraron improntas de granos de trigo y de cebada. También se descubrieron los restos de dos hoces. Las dos habían sido hechas de tres cuchillas de sílex incrustadas en brea, formando un ángulo. El asfalto a su vez había sido introducido en la ranura de un mango de madera. Los mangos se consumieron hace tiempo; sólo la impronta de la ranura se conservaba en el asfalto. Las cuchillas de hoces y las improntas de cereales indican que por lo menos algunos de los compartimentos servían para almacenar alimentos.

Por fuera de las paredes de uno de los edificios se encontraron varios cientos de semillas calcinadas en una gran zona quemada. Comprendían distintas variedades de trigo y de cebada y algunas semillas de algodón (*Gossypium*). Las semillas de algodón estaban tan mal conservadas que Costantini no ha sido capaz aún de determinar si proceden de una forma cultivada de la planta. Su presencia en compañía de las semillas de otras plantas cultivadas y cerca de un edificio utilizado al parecer para almacenamiento indica, sin embargo, que los colonos del Período II de Mehrgarh cultivaban realmente el algodón, porque apreciaban acaso sus fibras o bien sus semillas ricas en aceite. Los más antiguos testimonios anteriores del cultivo del algodón en esta zona se habían encontrado en yacimientos de la civilización del Indo posteriores al 2400 a.C.

Muchos miles de fragmentos de hue-



CINTURON DE CONCHAS, de 72 centímetros de perímetro. Apareció en una tumba del Período I. El lugar más próximo para el suministro de conchas es el Golfo Arábigo, a 500 km al sur de Mehrgarh.

sos de animales han aparecido entre los escombros de MR. 4. Casi todos ellos pertenecen a reses, ovejas y cabras domesticadas, con predominio del ganado vacuno. Está bien claro que las reses se convirtieron en fecha muy antigua en los animales dominantes que habían de seguir siendo en la prehistoria del Asia meridional. Es casi seguro que ellos proporcionaban la mayor parte de la carne de la dieta de los habitantes de Mehrgarh durante el Período II. Es posible que los empleasen también para arar y trillar y como animales de carga y productores de leche, pero las pruebas de estas funciones adicionales son sólo indirectas. Junto a la pared meridional de uno de los edificios compartimentados la excavación puso al descubierto un taller donde se manufacturaban cuentas de esteatita. Los taladros y lascas de sílex empleadas para elaborar este material blando aparecieron asociados a cuentas en varios estadios de elaboración, a esquirlas desechadas y esteatita por elaborar. Aquí se fabricaban también cuentas hechas de concha.

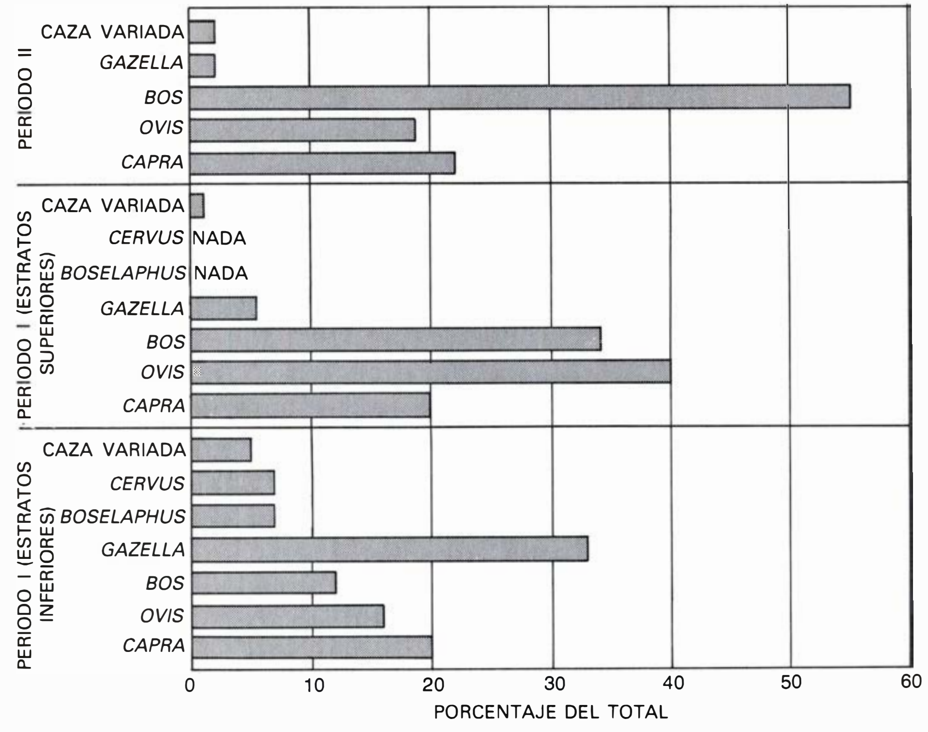
Un espacio libre situado al este del mismo edificio estaba cubierto de capas de huesos de animales mezclados con cenizas. Este espacio proporcionó más de 100 leznas de hueso y varias de las piedras con hendiduras utilizadas para dar forma a sus puntas. El ocre rojo era estimado en el Período II como lo había sido en el Período I; se encontraron algunas piedras de moler coloreadas por esta sustancia en compañía de varias tortas de la misma. Los útiles de sílex seguían siendo abundantes en el Período II, pero el metal continuaba escaseando. Sólo se han exhumado un anillo y una cuenta de cobre.

La cerámica del Período II es una loza fina, que sólo se encuentra en cantidades limitadas. Las formas más corrientes son tinajas rojas, con figura de pera y el borde encorvado hacia afuera. El barro de muchas tinajas está barnizado y su superficie ofrece señales de que se las hizo girar en el curso de su fabricación. Otros trabajos en arcilla incluyen dos figuritas humanas, muy estilizadas, dentro de la misma tradición, de sus precursoras neolíticas. Una de ellas está modelada en posición de sentada con las piernas juntas. La otra, conformada como un cono truncado, tiene la base decorada con discos de arcilla adheridos que posiblemente pretenden representar alguna clase de paño.

Un relleno poco compacto de superficie cubre el depósito del Período II en MR. 4. Contiene fragmentos de cerámica pintada y de piezas rudimentarias modeladas a mano que, por comparación con la cerámica similar de otros yacimientos de Beluchistán y Afganistán, se puede remontar a fines del quinto milenio a.C. y comienzos del cuarto. La cerámica, específicamente, se atribuye a un período llamado Kili Ghul Mohammad II, del nombre de un yacimiento que se remonta a *circa* 4000 a.C. y que Walter A. Fairservis, Jr., del Museo Americano de Historia Natural, excavó cerca de la ciudad de Quetta, en las tierras altas de Beluchistán, en 1951.

Para sintetizar la significación de los hallazgos del sexto y del quinto milenio efectuados en Mehrgarh, hay que decir que proporcionan a los prehistoriadores el primer bloque substancial de información acerca de un período que era casi desconocido con anterioridad en los registros arqueológicos del Asia meridional. Los poblados del Período I y del Período II eran de buen tamaño y permanentes; su repertorio arquitectónico abarcaba edificios simétricos, de múltiples habitaciones, y lo que evidentemente eran graneros. En el Período I se practicaba el cultivo de especies cereales y la cría de animales, además de la caza y la recolección, excluyéndose estas últimas en el Período II. Existían los oficios especializados. Una red de contactos a grandes distancias hacía llegar a Mehrgarh turquesas del Irán o de Asia central, lapislázuli del norte de Afganistán y conchas de las costas del Golfo Arábigo.

Tanto la variedad de las ofrendas funerarias como la desigualdad de su distribución indican que nos encontramos ante una población que practicaba cierto grado de diferenciación social. Las futuras excavaciones de los estratos más profundos del Período I deberán ampliar nuestra comprensión del papel desempeñado por los pueblos neolíticos de esta zona en los inicios de un modo de vida productor de alimentos en Asia meridional. Ya Mehrgarh ofrece pruebas de la existencia de un primitivo centro agrícola cerca del valle del Indo, y apoya con fuerza la hipótesis de que la revolución neolítica fue un acontecimiento complejo en el que se



TRANSICION DE LA CAZA AL PASTOREO, por parte de los aldeanos neolíticos de Mehrgarh durante el Período I. Se pone de relieve al analizar los huesos de animales hallados en las áreas MR. 3 y MR. 4. En los depósitos inferiores del Período I, representados en la parte baja de este gráfico, lo más abundante son los restos de gacelas (*Gazella dorcas*), cabras monteses (*Capra aegagrus*), carnero salvaje (*Ovis orientalis*) y reses bravas (probablemente *Bos nomadicus*). La categoría de "caza mixta" comprende animales que rara vez se consumen como alimento, tales como jabalíes, onagros, ciervos indios moteados, antílopes negros y búfalos de agua. Otras dos especies salvajes, el gran antílope llamado nilgo (*Boselaphus tragocamelus*) y el ciervo de los pantanos, o "barasingh" (*Cervus duranceli*), comparten el 14 por ciento de los restos animales de los depósitos inferiores. Ninguna de las dos especies está representada en los depósitos superiores del Período I (*centro*). El reducido tamaño de los huesos de ganado vacuno, oveja y cabra indica que por entonces estos tres animales estaban domesticados. A la llegada del Período II, después del Neolítico de Mehrgarh, la caza ha decaído de modo sensible; predomina el vacuno doméstico.

vieron envueltos más de un único centro nuclear de Asia occidental.

Alrededor del 4000 a.C. el poblado de Mehrgarh se trasladó hacia el sur, a la zona rotulada MR. 2. El detritus de la ocupación de este lugar, con sus casi tres metros de profundidad, encierra el registro del tercer período de la secuencia arqueológica del yacimiento. La continuidad queda demostrada por la presencia en MR. 2 de cerámica similar a la encontrada en la superficie de MR. 4 y por una serie de edificios compartimentados. Estos son algo mayores y más complejos que los del Período II.

La fase inicial del Período III se distingue por importantes progresos en las artes industriales. Si la cerámica fina del Período II da señales de haber dado vueltas por algún procedimiento durante su manufactura, la cerámica del Período III está claramente modelada a torno y fabricada en serie. Constituye una hermosa loza, decorada con motivos geométricos y seminaturales, tales como las hileras de pájaros o de cabras.

El lapislázuli, la turquesa y la cornalina se labraban en forma de cuentas, con incrustaciones cilíndricas hechas de jaspe verde. Las señales de desgaste de los trocitos de jaspe indican que fueron torneados por medio de taladros de arco. Los trozos de jaspe del Período III son los ejemplares más antiguos que se conocen de un tipo que se usó durante el tercer milenio a.C. en Shahr-i-Sokhta y Shahdad, en el Irán oriental y en el valle del Indo, donde (muy señaladamente en Chanhu-Daro) estuvo asociado con los talleres de cornalina de la civilización del Indo.

Esta documentación del temprano uso del torno de alfarero y del taladro de arco hace de Mehrgarh un centro de innovaciones técnicas más de 1000 años antes del comienzo de prácticas artesanas más elaboradas, tanto al este como al oeste. También hallamos los fragmentos de varios crisoles que se habían utilizado para fundir cobre. Indicios del metal estaban aún adheridos.

Otro adelanto importante producido en el Período III fue la diversificación agrícola. Añadiéndose a los cereales de los períodos anteriores, se cultivaron dos nuevos trigos de pan, el *Triticum aestivum compactum* y el *T. aestivum sphaerococcum*, y una nueva cebada, el *Hordeum hexasticum*. Costantini ha identificado también un género de cereal enteramente nuevo, la avena (*Avena*). La mejor prueba de que la práctica de una agricultura mixta de cereales, y la continuada cría de vacuno, ovejas y cabras, suministraba a la población del Período III alimento abundante, la proporciona el aumento del tamaño del poblado. Antes del final del período, el área de MR. 2 había crecido hasta casi abarcar 50 hectáreas.



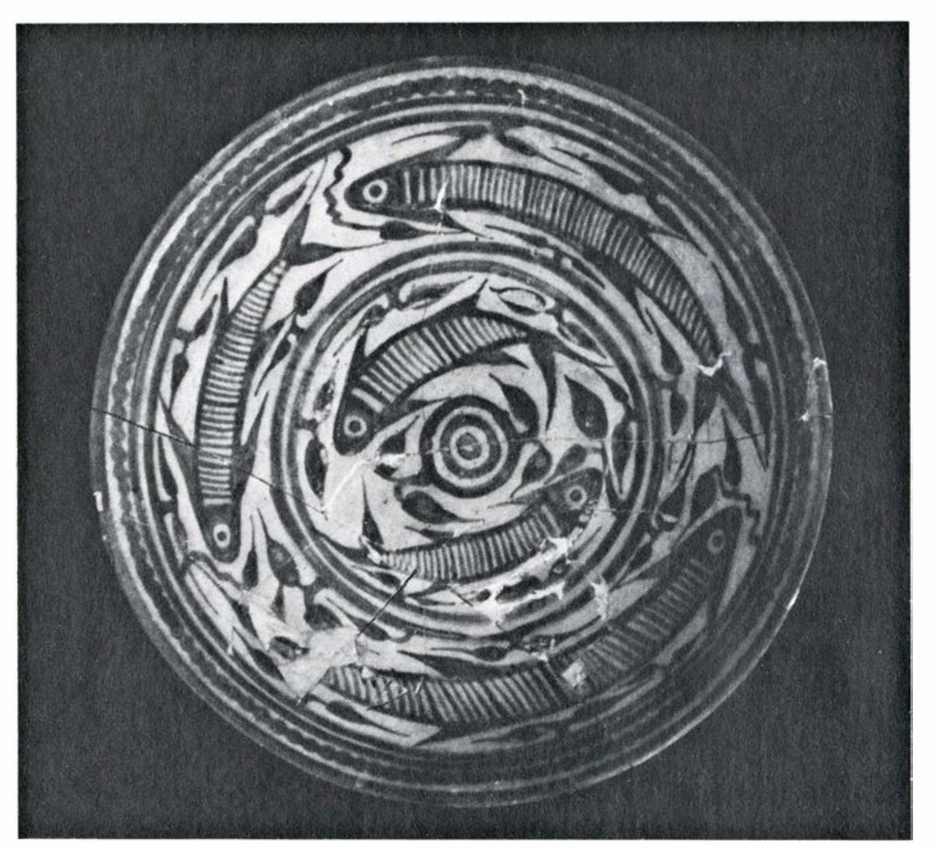
ESTOS DOS SELLOS DE TAMPON ostentan una abstracción simétrica y una figura de animal estilizado. Los sellos, hechos de terracota, eran provistos de un relieve negativo; el dibujo a la derecha de cada uno muestra la impronta que dejarían en el barro. El motivo abstracto es del Período VI, intervalo que duró desde el 3000 a.C. hasta el 2700, aproximadamente. El cebú macho (*abajo*) es del Período VII.

Alrededor del 3500 a.C. el poblado de Mehrgarh volvió a desplazarse hacia el sur. La nueva área se denomina MR. 1. Aquí la excavación ha puesto al descubierto edificios que contienen grandes tinajas de almacenamiento. Los ceramistas del Período IV también producían en masa cerámicas lisas, con gran variedad de formas y de espesor, entre ellas copas de una finura de cáscara de huevo. No abandonaron la producción de loza decorada, pero desaparecieron los temas de la cabra y del pájaro característicos del Período III, que fueron reemplazados por decoraciones geométricas, algunas de ellas con intrincados diseños polícromos. La gama creciente de formas y de tamaños cerámicos indica que los alfareros estaban respondiendo a una demanda mucho más diversificada.

También continúa la manufactura de estatuillas femeninas, y lo mismo que antes, las figuras están en posición sedente. De aspecto más naturalista, están hechas de terracota. El mismo material se empleaba para hacer sellos de tampón; estos y otros sellos, fabricados en hueso, son los primeros sellos de estampar que aparecen en Mehrgarh.

Hacia el año 3200 a.C. alcanzamos una etapa en la ocupación de Mehrgarh (el Período V) que es bastante conocida por las excavaciones del Irán oriental y del Paquistán occidental. Hace tiempo se creía que representaba el punto de partida del desarrollo y la prosperidad de la región. Parece que una serie de yacimientos de Beluchistán y del valle del Indo se fundaron en esta época: Es más, antes de que se conociesen las fases culturales aún más antiguas acreditadas en Mehrgarh, se consideraba el final del cuarto milenio a.C. como el momento inicial de las economías agrícolas desarrolladas del Asia meridional.

Se supuso entonces que el impulso que produjo el cambio en Beluchistán



CUENCO SOMERO, decorado con peces y plantas acuáticas pintadas de negro, representativo de las finas cerámicas grises que los alfareros de Mehrgarh producían en masa a finales del Período VII.

procedía de yacimientos de Asia central correspondientes a la fase de Namazga III en el desarrollo cultural, un impulso en que se había hecho sentir la mediación de yacimientos como Shahr-i-Sokhta en Irán y Mundigak en Afganistán. Sin embargo, ahora está claro que los pueblos indígenas, entre ellos los habitantes de Mehrgarh, desempeñaron una función más activa que pasiva en la transformación de esta parte de Asia, en la primera mitad del cuarto milenio.

También es evidente ahora que antes del 3200 a.C. unas extensas tramas comerciales unían Beluchistán con el este del Irán y el sur del Turquestán. Estas líneas de comunicación no sólo facilitaban el intercambio de mercancías, sino también el de ideas. Los intercambios se reflejan en los estilos similares de los utensilios que llegaron a caracterizar esta región más amplia. Por ejemplo, los sellos de tampón compartimentados, y una serie de complejos motivos de la decoración de la cerámica, son los mismos, o parecidos, de un extremo a otro de la región.

Tras el final del Período V, el área MR. 1 siguió siendo un próspero centro agrícola. El final del cuarto milenio a.C. y el comienzo del tercero abarcan los Períodos VI y VII de Mehrgarh. Las excavaciones en la zona han descubierto habitaciones que encierran grandes tinajas de almacenamiento. En los hogares han aparecido restos calcinados de trigo, cebada y avena al lado de piedras de moler. Las hoces, inalteradas con respecto a las del Período II; siguen siendo cuchillas de sílex incrustadas en brea. Una nueva aportación al inventario agrícola es la vid (*Vitis*) que aparece alrededor del 3000 a.C.

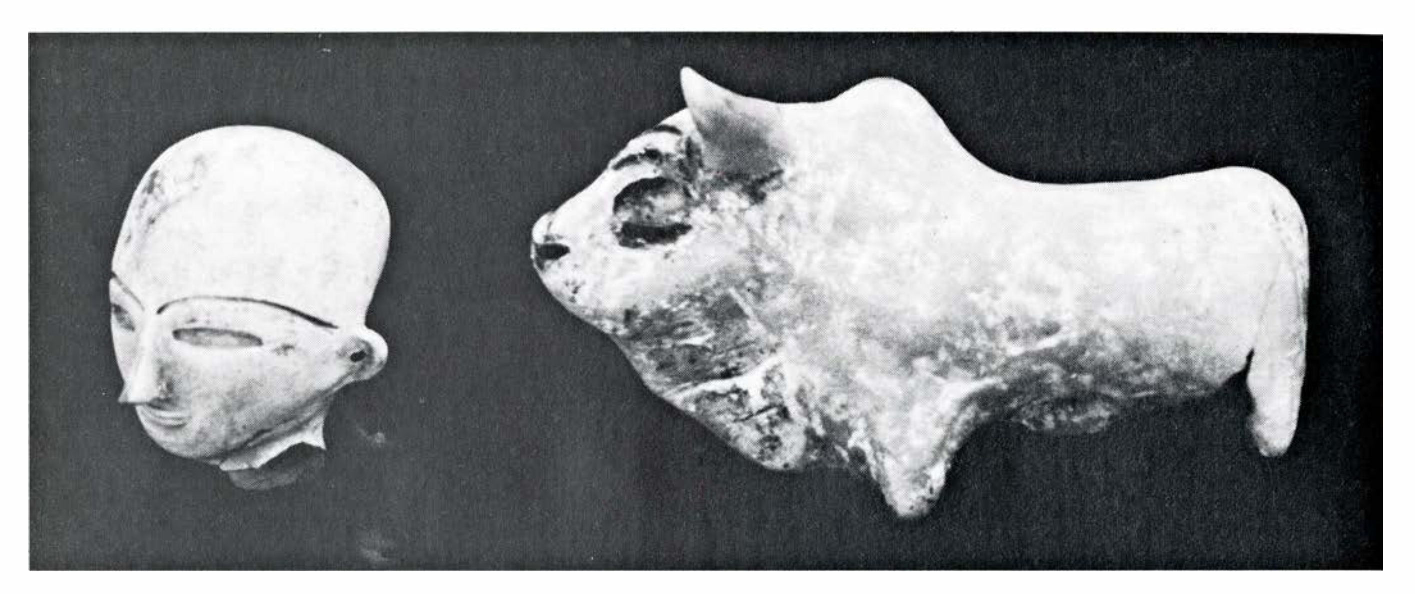
El rasgo más impresionante de los Períodos VI y VII es la producción de cerámica y de estatuillas en cantidad elevada. Al norte de MR. 1 Françoise Audouze y Catherine Jarrige, del CNRS, han localizado una zona donde se fabricaban vasijas alrededor del 2900 a.C. Más de 200 tinajas de varios tamaños se habían apilado allí, dispuestas en filas alternas o colocadas una dentro de otra. Una llamarada repentina, producida durante la cocción, acarreó el fallo de aquella hornada y los alfareros abandonaron simplemente las tinajas estropeadas en el mismo sitio en que se hallaban.

La misma técnica de cocción se emplea en esta zona hoy en día. Los alfareros empiezan por extender en el suelo una capa de paja, y colocan sobre ella entre 500 y 1000 vasijas sin cocer. Cubren éstas de más paja, de una capa de trozos de cerámica y, por último, de un techo de barro. Se prende fuego a la paja, que arde durante unas 24 horas; la pila se deja después enfriar durante una semana. Al analizar los restos de loza, Audouze y Catherine Jarrige descubrieron que cinco milenios antes se utilizaba un procedimiento idéntico. Esta es una prueba significativa de la manufactura semi-industrial de vasijas tipificadas en aquella época. Los cacharros estaban probablemente destinados a su distribución regional, igual que lo están los que allí se hacen hoy.

También aumentó la producción de estatuillas femeninas. En el Período VI todavía se modelaban en postura de sentadas, pero las piernas están rodeadas ahora de una espira de barro, la cara lleva unos ojos saltones adheridos, y grandes rollos de arcilla a cada lado del rostro dan la impresión de un tocado de fantasía. El torso se representa con mayor realismo, modelándolo con unos senos pendulantes, parcialmente ocultos por collares de muchas vueltas.

El Período VI duró desde el 3000 a.C. hasta el 2700, aproximadamente, en que comenzó el Período VII. En la última fase del Período VII, que acaba un siglo más tarde, el área MR. 1 estaba ocupada por una enrevesada serie de habitaciones. Varias de entre ellas tenían dos pisos superpuestos; el de la planta baja era una habitación de poca altura, usada como almacén, con el techo a sólo un metro del nivel del suelo. Unas vigas de madera para el techo y unas filas paralelas de viguetas sostenían el piso de la habitación de arriba, donde a menudo se guardaban tinajas de almacenamiento. En una de las habitaciones bajas del sótano se habían almacenado unas 200 vasijas; éstas son notables por su variedad de formas y motivos decorativos.

Al norte de esta zona de residencia y almacenaje combinados, había espacios abiertos donde la cerámica se cocía en hornos. Se han descubierto hasta tres niveles de hornos, unos encima de otros. Las bases de los hornos son ovales o circulares y los hornos en sí, a juzgar por lo excavado, sólo tienen un nivel. Es probable que en realidad no fuesen tan sencillos, sino que tuviesen un segundo nivel, hecho quizá de materiales poco consistentes y que se deshacía después de cada cocción. De todos modos, los hornos eran lo bastante eficaces para alcanzar temperaturas aptas para vitrificar el material que se estaba cociendo. En los montones de



REPERTORIO DE LOS CERAMISTAS del Período VII, que comprendía representaciones humanas finamente modeladas (*izquierda*) y figuras de animales más estilizadas (*derecha*). La cabeza, cuyo cuerpo no apareció, mide 4,5 centímetros de alto; y el cebú tiene 9,5 centímetros de largo.

cenizas asociados con ellos, los restos calcinados de semillas y de excrementos de animales indican que la paja y el estiércol se empleaban como combustible, como es aún costumbre en la actualidad.

A juzgar por los enormes montones de vasijas y de estatuillas rotas, los alfareros de la última fase del Período VII estaban dedicados a la producción en gran escala. Algunas vasijas son ejemplos tan elegantes de artesanía de calidad que tienen categoría de obras de arte. Entre ellas hay copas y cuencos de una cerámica gris fina, decorada con motivos geométricos, florales y animales pintados en negro. Algunos ejemplares de esta cerámica gris se han hallado tan lejos de Mehrgarh como el Irán oriental.

Las estatuillas del Período VII están representadas por miles de fragmentos, en su mayoría brazos y piernas, y por algunas piezas intactas o poco menos. Ningún otro yacimiento de Beluchistán encierra una concentración tan grande de estos objetos. Las figuras ya no están sentadas, sino que se encuentran erguidas. Las cabezas siguen siendo estilizadas, con ojos saltones y narices ganchudas; por lo demás el modelado es más naturalista que antes. Por ejemplo, una leve curvatura de la cadera hacia fuera da a las figuras femeninas un encanto que parece vaticinar representaciones hindúes posteriores de mujeres. Las figuras masculinas aparecen ahora en Mehrgarh por primera vez en cantidades importantes; representan aproximadamente el 30 por ciento de las figuras identificables por el sexo. Las figuras femeninas despliegan una amplia gama de peinados pintados de negro y de adornos pintados de amarillo. Las figuras masculinas portan un gran turbante y un medallón parecido a una corbata. A finales del Período VII las posturas se han hecho más rígidas, y las estatuillas están modeladas del modo bastante estereotipado que aparece en otros muchos yacimientos de Beluchistán y de los territorios vecinos.

Las figuras de animales de terracota comprenden representaciones de un bóvido con jiba, el cebú (*Bos indicus*), de jabalíes y varias aves. Todos son de buena factura y recuerdan a las representaciones de animales de la civilización del Indo. Un hallazgo único es la figura de un carnero esculpido en alabastro. También se han descubierto muchos sellos de tampón. La mayoría de ellos están hechos de terracota; uno ostenta la figura de un cebú macho corriendo. La mayoría de estos sellos tienen contorno circular.

Algunas de las variedades de cerámica y otros objetos de los niveles tardíos del Período VII recuerdan también a utensilios característicos de la civilización del Indo. Entre ellos se encuentran los "pasteles" triangulares, hechos de terracota, y las hojas de sílex de lados paralelos, algunas de 18 centímetros de largo. En rigor, los restos de superficie de una loma pequeña situada a unos ocho kilómetros de Mehrgarh son evidentemente productos de la fase avanzada de la civilización del Indo. Sin embargo, no hay testimonios de una ocupación de Mehrgarh misma por la civilización del Indo, aunque un cementerio posterior al Período VII pudo haber sido contemporáneo de aquella fase.

Al sur de MR. 1, Marielle Santoni, del CNRS, ha excavado gran cantidad de tumbas y cenotafios (monumentos funerarios). La cerámica, los vasos de bronce y otros objetos encontrados son idénticos del todo a los de los ajuares que aparecen en los cementerios de varios yacimientos del sur del Turquestán. Cementerios similares se han localizado en Afganistán, en yacimientos pertenecientes al conjunto cultural Dashli. La presencia en Mehrgarh de este material, que se remonta al 2000 a.C. o incluso más atrás, en los confines de la patria de la civilización del Indo, tiene a su vez un paralelo a la inversa en el norte del Afganistán, donde un poblado del Indo se ha descubierto en Shortugai, a la orilla del Amu Darya.

Queda mucho por hacer en Mehrgarh. Los resultados provisionales de nuestras seis primeras campañas demuestran, sin embargo, que los modelos teóricos empleados en la interpretación de la prehistoria del Asia meridional deben revisarse enteramente. Este rico yacimiento proporciona una secuencia arqueológica con una larga serie de ocupaciones. La secuencia revela un proceso ininterrumpido de elaboración, que afectó al cultivo de los cereales, a la cría de ganado, a los oficios, a la arquitectura e incluso a la ideología.

Paso a paso, puede uno contemplar cómo se va disponiendo el escenario para el desarrollo de los complejos esquemas culturales que se manifestaron en las grandes ciudades de la civilización del Indo a mediados del tercer milenio a.C.

Tecnología de las memorias de disco

Los datos para un computador se almacenan sobre un disco en rotación como diminutas regiones magnéticas. En los sistemas que se están diseñando, un láser "escribirá" y "leerá" los datos

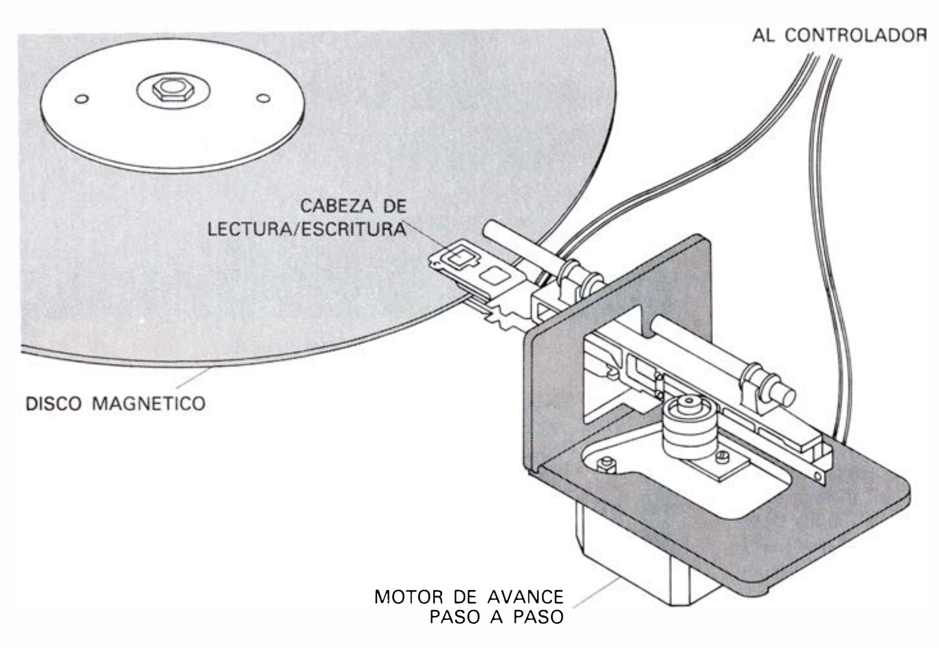
Robert M. White

La velocidad de procesamiento de datos por parte de los ordenadores se ha multiplicado por cien en los últimos años. Tal avance se ha apoyado en el progreso de otras tecnologías. En particular, la técnica del almacenamiento de datos ha avanzado también espectacularmente. La información contenida en un libro del tamaño de un gran diccionario no abreviado puede conservarse ahora bajo la forma de diminutos modelos magnéticos en un disco en rotación rápida. Pero se va a superar hasta esa misma capacidad. En un futuro próximo, mediante un sistema óptico en el que un láser almacenará y recuperará la información, podremos guardar en un disco el contenido de una biblioteca de varios miles de libros.

Los sistemas magnéticos y los ópticos se asemejan en muchos aspectos. Ambos emplean discos; ambos necesitan de una cabeza para "escribir" los datos en la superficie del disco y poderlos "leer". En un caso, la cabeza es un mecanismo electromagnético que en esencia es similar a la cabeza de un magnetofón convencional. En el otro caso, la cabeza es un láser con su óptica asociada. Además, tanto los sistemas magnéticos como los ópticos precisan mecanismos que coloquen la cabeza en la posición correcta en pistas de datos específicas a determinados radios del disco, y ambos necesitan de un sistema electrónico que medie entre la memoria de disco y un computador. El sistema electrónico codifica los datos de un modo útil para su almacenamiento y luego los descifra para su vuelta al computador. En muchos diseños, a los datos que entran en la memoria se añaden señales que luego podrán emplearse para localizar cualquier error introducido en el proceso de almacenamiento.

Es probable, asimismo, que las memorias de disco magnéticas y las ópticas entren a formar parte de un mismo sistema de información. Una gran memoria óptica de disco bien pudiera servir de archivo. Dentro de una gran empresa podría almacenar toda la acumulación anual de documentos y sustituir los ficheros. Al tiempo que otras memorias magnéticas de disco, más pequeñas, distribuidas por la empresa podrían servir para usos específicos. En estos sistemas más reducidos los discos presentarían la ventaja de poder ser trasladados de un lugar a otro. El inconveniente que tienen es su mayor facilidad para los "accidentes", o pérdidas de datos, debido a que el trasiego de los discos los hace vulnerables a la suciedad. Hasta una partícula de polvo del tamaño de una bacteria puede dar al traste con la escritura o lectura de datos. Los discos no trasladables ofrecerían un mejor rendimiento (y menor coste), pero un corte en el suministro de energía eléctrica podría hacer inservibles sus datos.

Las aplicaciones de la tecnología de los discos no se reducen al almacenamiento de documentos. Una señal de audio, como la corriente eléctrica generada por un micrófono, puede medirse muchos miles de veces por segundo; la intensidad de cada medida puede representarse mediante un número. De esta forma, una señal que es continua en el tiempo, una señal analógica, se convierte en una señal discontinua, digital. Del mismo modo, una fotografía puede convertirse en un mapa de datos digitales midiendo el ennegrecimiento de la imagen en dos dimensio-

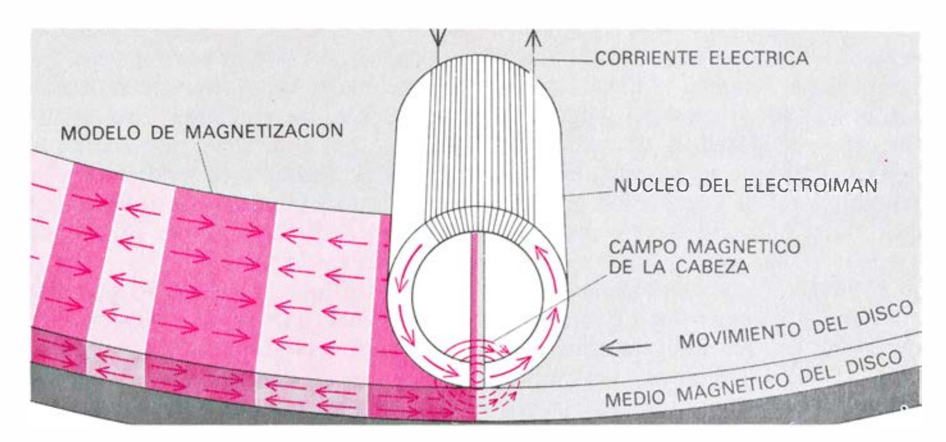


MECANISMO DE DISCO MAGNETICO que constituye la memoria secundaria en un sistema de computador moderno. En la memoria primaria del sistema (englobada dentro del mismo computador) la recuperación de los datos es más rápida, aunque la memoria secundaria es más barata en razón de su capacidad de almacenamiento de datos. La configuración aquí mostrada es la típica. Un motor sitúa la cabeza de lectura/escritura sobre las pistas de datos de un disco sometido a una elevada rotación.

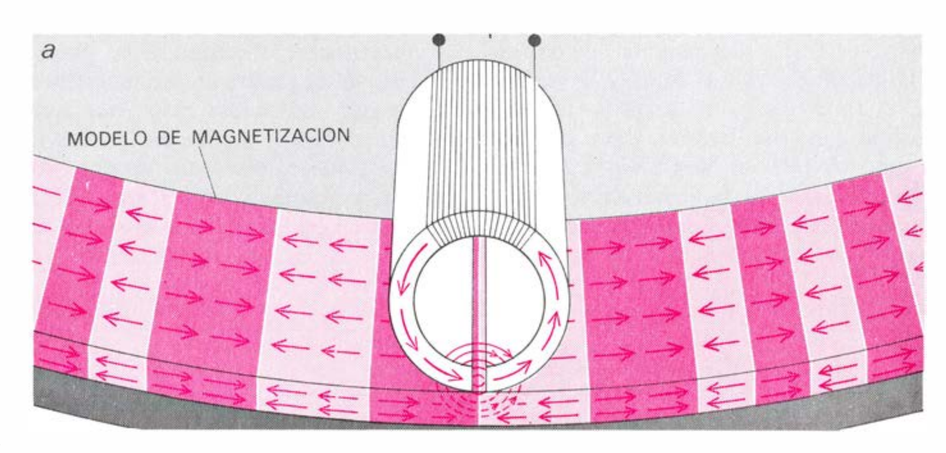
nes espaciales. Una aplicación que ya está en estudio es el almacenamiento en discos, y de forma digital, de los miles de imágenes de rayos X que se acumulan en un centro hospitalario.

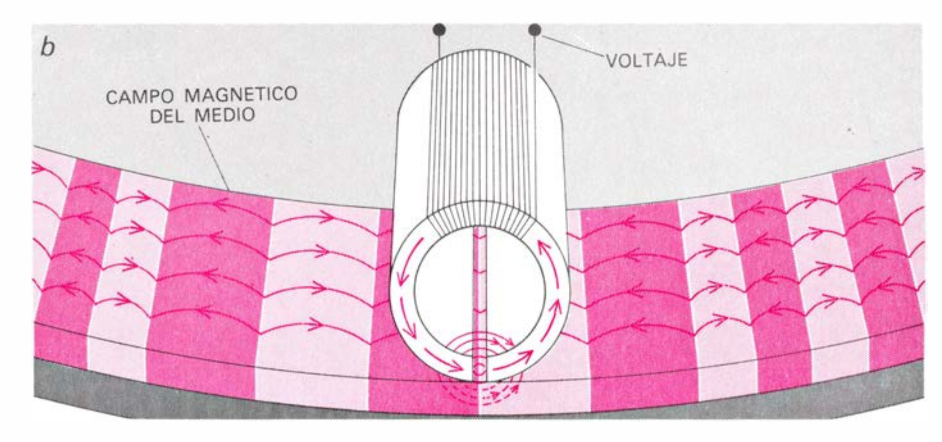
La ventaja fundamental de la conversión de las señales analógicas en digitales es que, bajo esta última forma, podemos procesar, transmitir y almacenar los datos casi sin error, aun cuando no se recurra a señales para localizar los errores. La razón es la siguiente. La información digital se acostumbra a representar por una secuencia de dígitos en que cada uno de ellos es un bit (sólo puede tomar los valores 0 o 1). Las pequeñas zonas del medio en las que se guarda esta información binaria (por ejemplo, el revestimiento de óxido de hierro de un disco magnético) deben de poder llevarse a un estado o a otro para representar los datos. En el caso del almacenamiento magnético, esos dos estados son los extremos en los que el campo magnético dipolar del medio se satura (alcanza un máximo) para una orientación o para la orientación opuesta. Los dos estados pueden distinguirse hasta tal extremo que la información guardada prácticamente nunca se deteriora por irregularidades, como un débil campo electromagnético generado por la cabeza de lectura y escritura o por la información contigua almacenada. En una memoria de disco magnético de alto rendimiento, los errores debidos a suciedad y a otros problemas mecánicos deterioran aproximadamente un bit de cada diez mil millones. Estableciendo códigos para la detección de errores, su proporción se reduce a un bit entre cada diez billones.

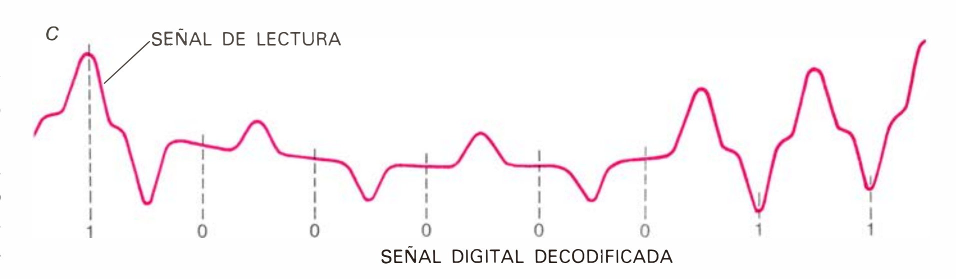
El ingeniero danés Valdemar Poulsen presentó el primer registrador magnético en la exposición de París de 1900. Hacía 23 años que Thomas Edison había construido el fonógrafo. El mecanismo de Poulsen consistía en un cable de piano de acero situado sobre una ranura en espiral alrededor de la superficie de un tambor. Un electroimán hacía contacto con el alambre y podía deslizarse libremente a lo largo de una varilla paralela al eje del tambor. La rotación del tambor empujaba al electroimán varilla abajo. Cuando por el electroimán circulaba la corriente procedente de un micrófono, quedaba magnetizado un segmento de alambre proporcionalmente a la intensidad de la corriente. Aunque el invento de Poulsen creó una gran sensación, la señal grabada era débil. No fue hasta la invención del amplificador por tubo de vacío, en la década de 1920, cuando la



ESCRITURA DE DATOS, para su almacenamiento en el medio magnético del disco, mediante una cabeza que es similar en principio a la de un magnetofón. La corriente eléctrica suministrada a la cabeza pasa a través de una bobina alrededor de un núcleo de material magnético. Este núcleo proyecta un campo magnético sobre el disco, magnetizando el medio en un sentido u otro según sea el de la corriente.







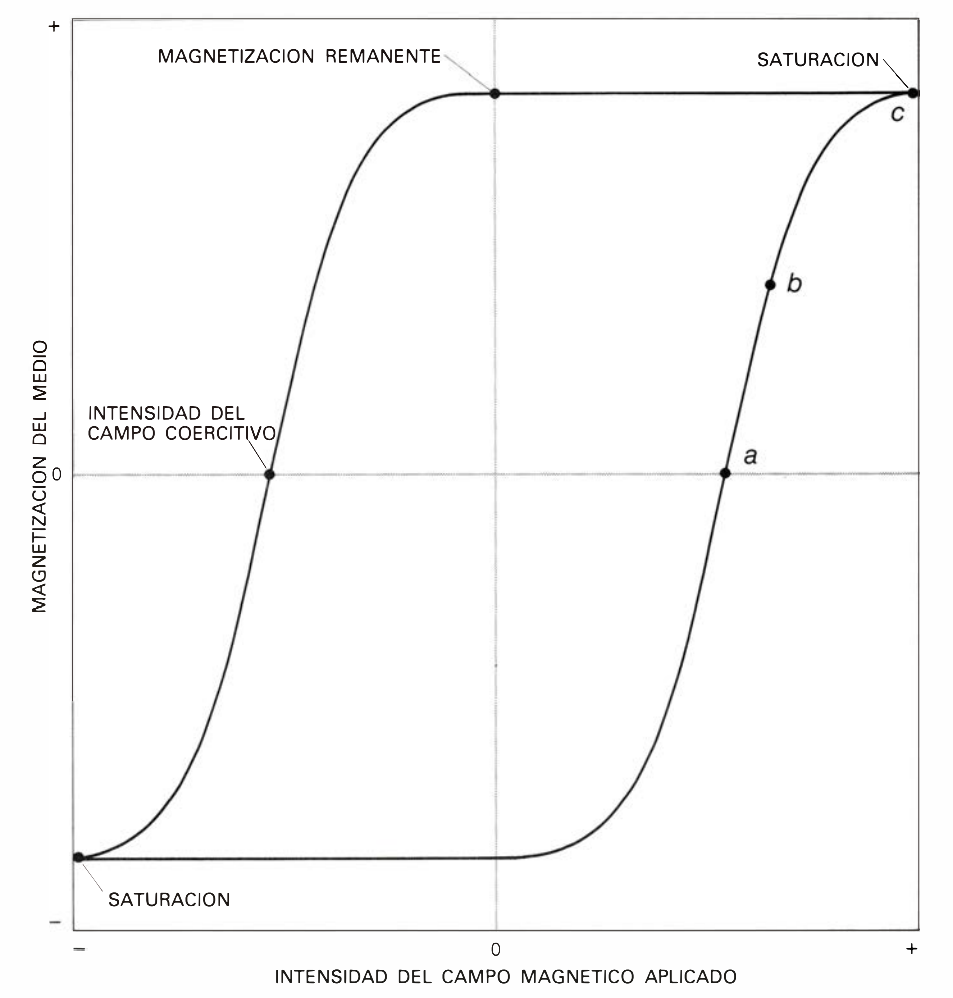
LECTURA DE LOS DATOS por medio de la misma cabeza empleada para escribirlos. Los datos almacenados (*a*) son digitales; cada dato, o bit, es un 0 o un 1. El 1 se registra como zona del disco donde la magnetización se invierte y un 0 como una ausencia de tal inversión. También se encuentra una magnetización entre cada bit almacenado. A medida que gira el disco, los campos magnéticos correspondientes a los datos guardados (*b*) pasan sucesivamente bajo la cabeza. Los campos variables inducen una señal (*c*) en el voltaje de la cabeza, que se convierte de nuevo en forma digital. Los primeros siete bits de la señal decodificada son 1000001, que representan la letra *A*. Un octavo bit, de control, tiene asignado el valor 1 porque el resultado de la suma de los siete bits anteriores es un número par.

grabación magnética empezó su firme desarrollo. El alambre de piano evolucionó hacia la cinta plástica con un recubrimiento de material magnético. En otra configuración se revistió un tambor en rotación con un material magnético en el que podían grabarse las señales sobre numerosas pistas circulares. Cada pista tenía su propio electroimán. Estos dispositivos se convertirían en las memorias de los primeros computadores modernos. Se trataba en realidad de memorias primarias: sistemas para el más rápido almacenamiento y recuperación de los datos.

Las tecnologías actuales, basadas en elementos semiconductores, aportan la memoria primaria de un ordenador. La memoria secundaria, mayor y más lenta, guarda información a un coste por bit inferior. Los dispositivos que hoy en día desempeñan esta función se fundamentan en discos magnéticos. La memoria terciaria, todavía más grande, lenta y barata, se basa ahora en cintas magnéticas. Tal jerarquización de las memorias permite a los usuarios de computadores optimizar rendimientos y costes. De hecho, ciertos sistemas computadores permiten dirigir el flujo de información de forma que los datos, procedentes de cualquier nivel jerárquico, estén en el nivel primario de la memoria cuando sea necesario. Es como si todos los datos estuviesen en este nivel. Este principio se conoce como memoria virtual.

La escritura magnética –o grabado de los datos en un medio magnético– se basa hoy en el mismo principio que el dispositivo de Poulsen. Cuando circula una corriente por una bobina se produce un campo magnético. Este campo queda en gran parte confinado en un núcleo de material magnético en forma de anillo alrededor del que está arrollado un alambre. En el material magnético se ha cortado una estrecha ranura, y es precisamente el campo de las proximidades de la ranura el que magnetiza una región del medio magnético que recubre el disco y escribe así los datos.

La misma cabeza que escribe los datos sirve también para leerlos. Una forma de realizar esto se basa en el principio de inducción, formulado en 1831 por Michael Faraday, que afirma que la presencia de un campo magnético variable induce un voltaje sobre un circuito abierto, una espira de cable conductor por ejemplo. En el caso de una cabeza colocada frente a un disco magnético en rotación, sobre el que se han escrito los datos, los campos magnéticos surgen de las regiones magnetizadas del disco. Durante el tiempo que la cabeza permanece sobre una región uniformemente magnetizada, el campo se mantiene más o menos constante y, en consecuencia, no se induce ningúna diferencia de potencial a través de la bobina que forma parte de la cabeza. Sin embargo, cuando ésta se mueve por una región donde la magnetización del medio presenta una inversión de un estado al otro, se produce una rápida variación del campo, originándose, por tanto, un pulso de voltaje. De este modo, los datos digitales guardados se leen como una señal analógica, convertible sin dificultad en forma digital de nuevo.



SE LLAMA CICLO DE HISTERESIS al grado de magnetización que recibe un material cuando le aplicamos un campo magnético. La magnetización del material aumenta primero desde cero (*a*) hasta un máximo, o saturación (*c*). Aunque descienda luego la intensidad del campo, no se perderá la magnetización. La inversión del campo provoca saturación, aunque con magnetismo orientado en sentido opuesto.

La escritura y lectura de los datos dependen de las propiedades magnéticas tanto del medio donde se almacenan los datos como de la cabeza que los escribe y lee. Empezaremos por hablar del medio. En uno de los métodos empleados para su fabricación, se recubre un disco de aluminio con una suspensión que contiene la forma gamma del óxido de hierro, en la cual el óxido está constituido por partículas en forma de aguja de un micrometro (10^{-4} centímetros) de longitud y una décima de micrometro de anchura, aproximadamente. Los átomos de hierro de cada partícula tienen sus propios campos magnéticos diminutos, pero debido a la forma alargada de la partícula, los campos tienden a alinearse según el eje mayor de la partícula. Así, cada aguja es un pequeño imán y crea un campo magnético dipolar. El único cambio posible en el campo es una inversión de los polos norte y sur de los extremos de la aguja. La magnetización global de una región del disco es la suma de los campos de todas esas partículas en forma de aguja que hay en su interior.

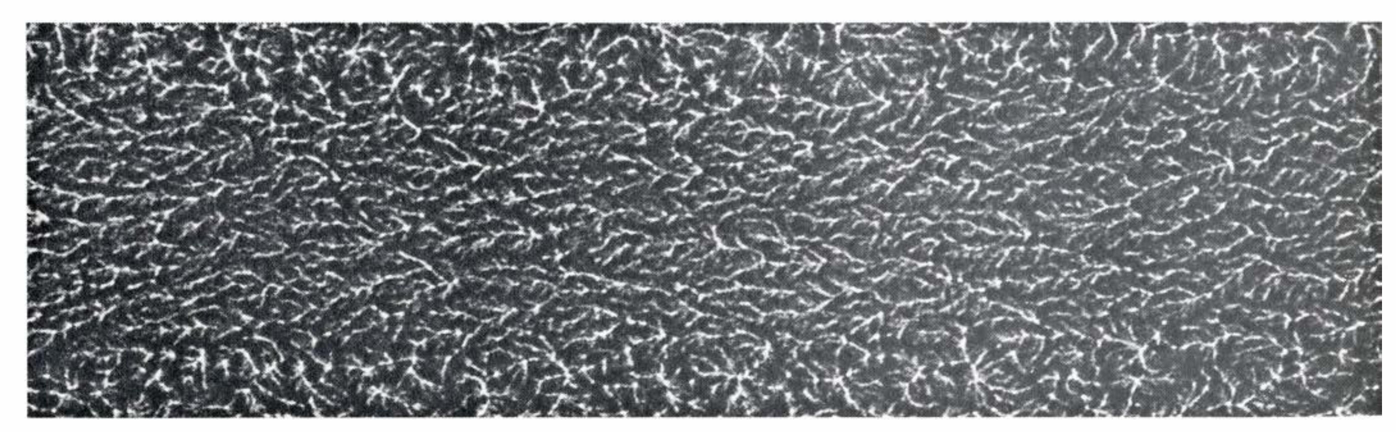
La magnetización de una región del disco será evidentemente máxima si todas sus agujas están alineadas y poseen, además, sus polos norte (o sur) encarados en la misma dirección. Durante el proceso de fabricación se consigue el alineamiento de todas las agujas haciendo girar el disco en presencia de un campo magnético antes de que la suspensión se haya secado. Las agujas se sitúan en el plano del disco, más o menos perpendiculares al radio

a

b

c

TRES ESTADOS DE LA MAGNETIZACION del medio de un disco, en esquema. Corresponden a los puntos denominados *a, b* y *c* del ciclo de histéresis de la ilustración precedente. En este caso, el medio magnético consiste en partículas de óxido de hierro en forma de aguja. Cada partícula tiene su propio campo magnético. En *a* la magnetización es cero, mientras que en *c* está saturada en una región que mide ocho por 40 micrometros.



MODELO REAL DE MAGNETIZACION sugerido por esta micrografía electrónica por efecto Lorentz. Para producir la imagen, se envió un haz de electrones a través de una fina película de cobalto-renio magnetizada. La magnetización desvió las trayectorias de los electrones. Las figuras en forma de pluma se deben a que la magnetización no es uniforme. Sus ramificaciones tienen una longitud aproximada de medio micrometro.

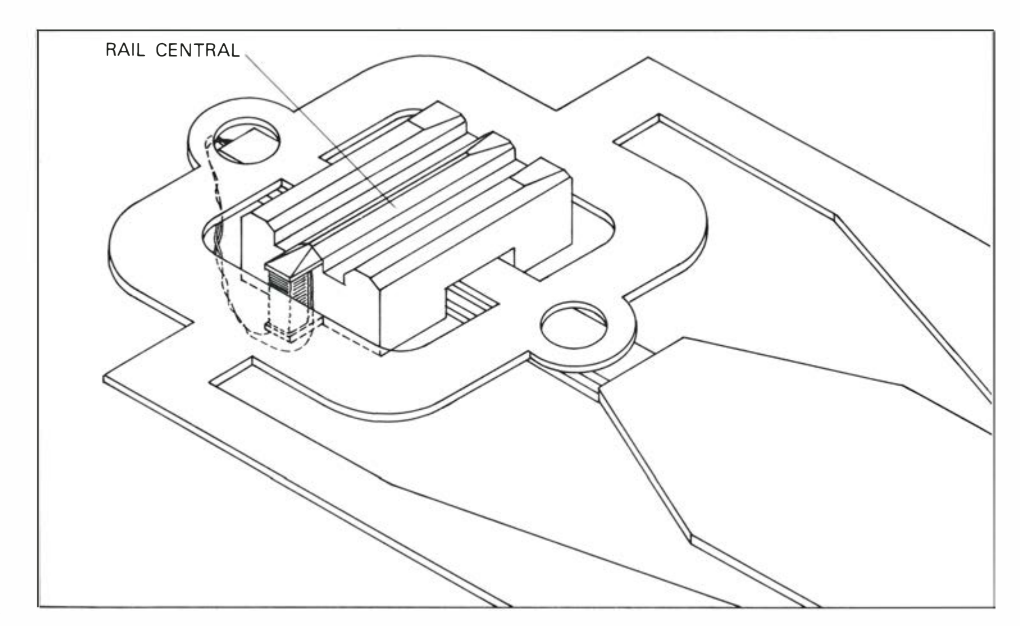
correspondiente. En una memoria de disco en funcionamiento, se alinean con bastante exactitud en la dirección del movimiento del disco.

La alineación de los polos se obtiene cuando se escriben los datos. En concreto, se alcanza cuando la cabeza crea un campo magnético sobre el medio. Las partículas magnéticas están lo bastante alejadas unas de otras como para que sus respectivos campos no interaccionen mutuamente. Al aumentar la amplitud del campo aplicado, sin embargo, algunas partículas magnéticas cuyos dipolos se oponen a la dirección del campo magnético aplicado invierten el campo dipolar. A la larga, el campo aplicado resulta ser lo suficientemente intenso como para polarizar todas las partículas. Hay que señalar la aparición de dos complicaciones. Primera, al aumentar la distancia a la cabeza, el campo que crea disminuye rápidamente. Segunda, el medio está moviéndose y, en consecuencia, sale de la región donde el campo tiene intensidad suficiente para polarizarlo. Será, pues, el límite posterior del campo el que gobierne la orientación final de la magnetización.

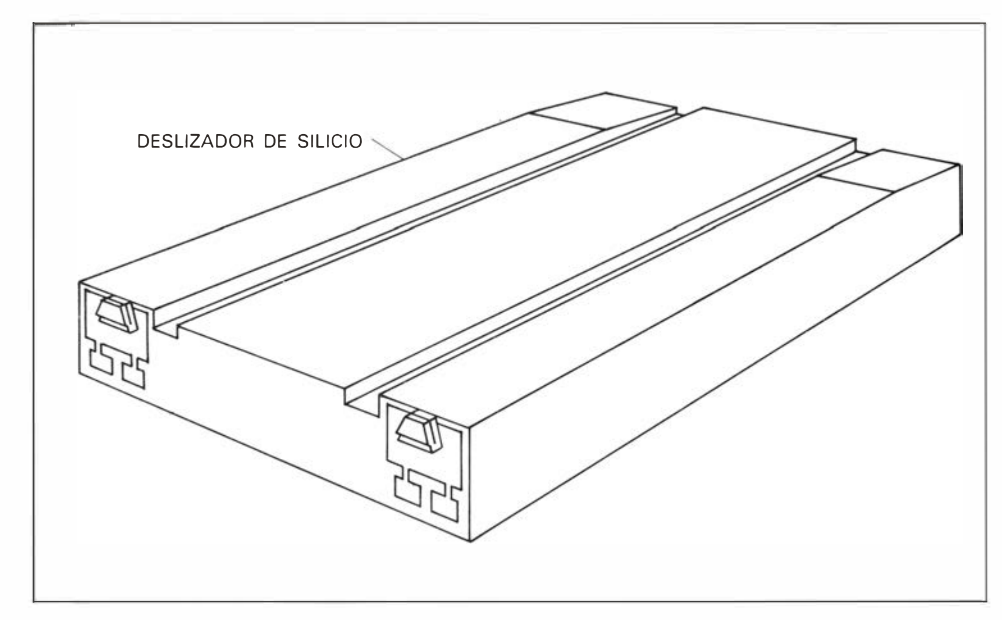
La región del medio magnético que ha quedado polarizada seguirá estándolo al cesar el campo de la cabeza. Ello permite almacenar datos. Podemos anular la magnetización y hacerla luego saturante en el sentido contrario, invirtiendo el flujo de corriente en la cabeza y aplicando por tanto sobre el medio magnético un campo de polaridad invertida. Puesto que la magnetización del medio persiste, la inversión del campo magnético no provoca la inversión inmediata del curso de acontecimientos por los que el medio quedó magnetizado la primera vez. Este fenómeno se denomina histéresis. Por histéresis suele entenderse el retraso de un suceso debido a otro que ha ocurrido con anterioridad, en este caso la magnetización previa. Conforme el campo magnético va oscilando, el grado de magnetización del medio describe una curva, denominada ciclo de histéresis.

El medio magnético que recubre el disco requiere que el magnetismo remanente (el magnetismo que persiste en ausencia de campo magnético) sea grande. Conviene asimismo que, para desmagnetizar el medio, se requiera un campo magnético moderadamente intenso. Ambas exigencias ayudan a asegurar la permanencia de los datos almacenados. También interesa lograr la inversión de la magnetización del medio para un pequeño intervalo de intensidades del campo aplicado. Con ello nos aseguramos que los estados del medio empleados para el almacenamiento queden bien definidos. Todos esos criterios se sintetizan en el requisito de que el ciclo de histéresis para el medio magnético sea grande y casi cuadrado.

Las dos posibles saturaciones de la magnetización del medio son los dos estados empleados para el almacenamiento de los datos digitales. Sin embargo, ello no significa que a uno de los estados se le asocie el 1 y al otro el 0. Se emplean esquemas más complejos, en parte a fin de introducir una variación periódica en la corriente de lectura. Tales periodicidades son útiles como señales de sincronización en los sistemas de computadores. Una razón por la que se usan esos sistemas estriba en que, como se expuso antes, la lectura de los datos depende de la colocación de la bobina en un campo magnético variable, y no en un campo constante. En un código denominado modulación a frecuencia doble, un 1 viene representado por una inversión en la magnetización y un 0 por una ausencia de tal inversión. También se inserta una inversión adicional después



CABEZA WINCHESTER, introducida en 1973 por la International Business Machines Corporation. Aparece aquí vuelta al revés; en realidad, las superficies en forma de raíl quedan frente al disco a una distancia de medio micrometro. El flujo de aire bajo los raíles externos genera una fuerza aerodinámica que sustenta la cabeza. El electroimán responsable de la lectura y escritura de los datos está adosado al

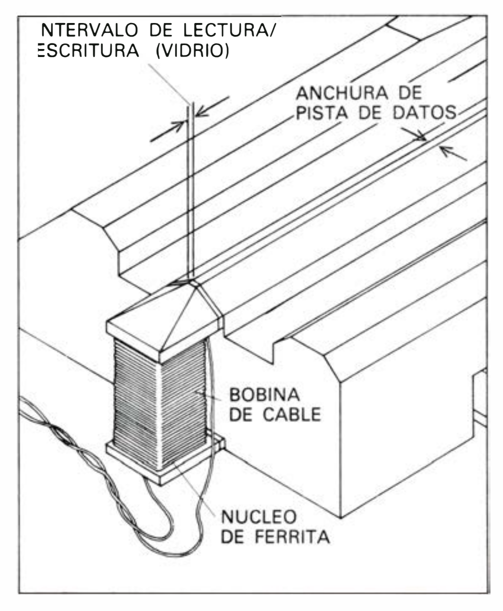


CABEZA DE PELICULA DELGADA (mostrada también vuelta al revés, pero no a la misma escala). Carece de la bobina de cable en su electroimán, y en su lugar emplea una película espiral de conductor eléctrico. El núcleo del electroimán es permalloy, una mezcla de hierro y níquel. (El núcleo de la cabeza Winchester es ferrita: un óxido de hierro en combinación con otros metales.) El electroimán está situado

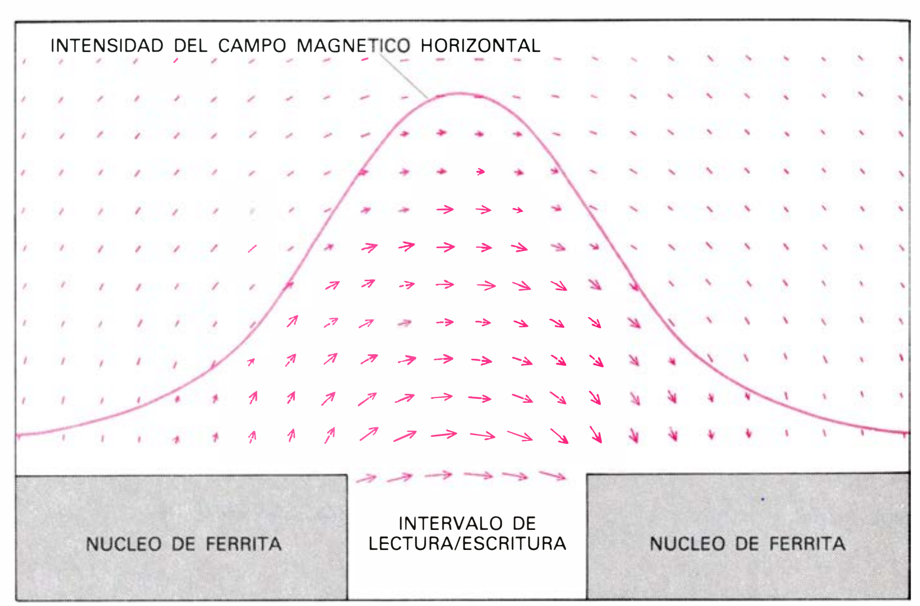
de cada bit a fin de proporcionar una señal de temporización. La codificación requiere un máximo de dos inversiones por bit. Existen otros códigos que presentan la ventaja de necesitar menos inversiones. Por ser estos códigos más susceptibles de error, hemos de emplear parte de la capacidad extra como bits adicionales que sirvan para la corrección de errores.

El almacenamiento de un documento nos servirá de ejemplo del más simple de estos esquemas. En el American Standard Code para el intercambio de información, cada carácter de un lenguaje viene representado por siete bits. Por ejemplo, la letra *A* es 1000001. A menudo se añade, para cada carácter almacenado, un octavo bit, denominado bit de "paridad" o de prueba, al objeto de determinar si son correctos los siete bits precedentes. El valor del bit de paridad es 0, si la suma de los siete bits anteriores es un número impar, y 1, si es un número par. Por tanto, la letra *A* se almacenará bajo la forma 10000011.

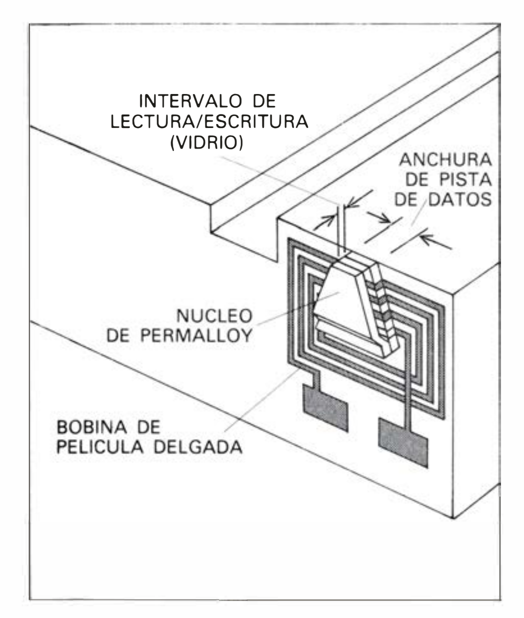
El empleo del bit de paridad puede ayudar a localizar sólo en cuál de estos grupos de siete bits está el error. Un código más complejo, desarrollado en 1950 por R. W. Hamming, emplea un mayor número de bits y proporciona la dirección exacta de un bit erróneo. Por tanto, la corrección del error requiere tan sólo la conversión de un 0 en un 1, o viceversa. En un esquema todavía más complejo, los bits de datos son tratados como los coeficientes de un polinomio. El polinomio se opera algebraicamente para obtener un conjunto menor de bits, que se guardan en memoria. En caso de error se recurre a estos bits para reconstruir los datos. El último esquema resulta particularmen-



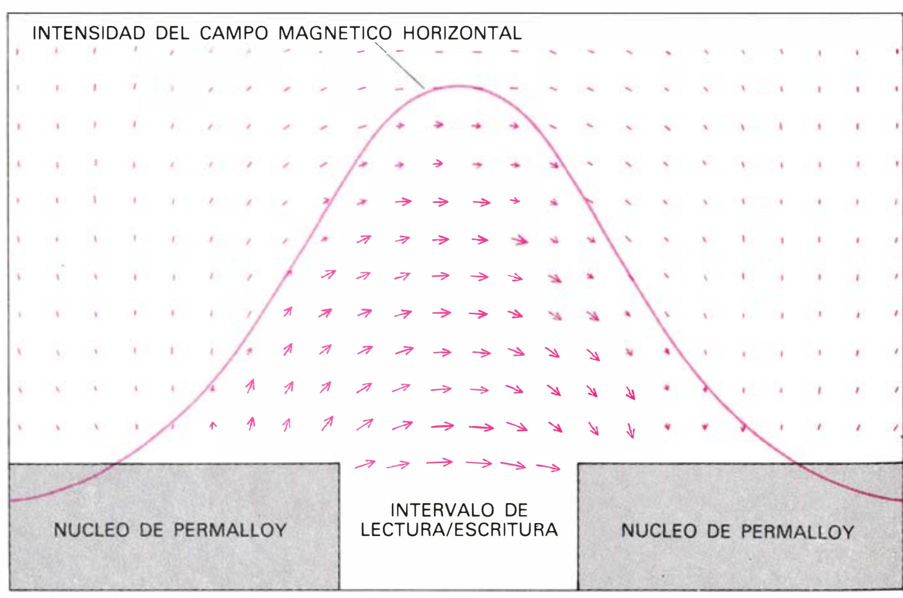
extremo posterior del raíl central. A la derecha puede verse el electroimán con cierto detalle. La anchura de la parte biselada del raíl central corresponde a la anchura de una pista de datos.



CAMPO MARGINAL DE UNA CABEZA WINCHESTER. Es el campo magnético situado en el exterior del intervalo de lectura/escritura del núcleo del electroimán. Las flechas muestran la orientación del campo, y sus longitudes, la intensidad. La curva también indica la intensidad, pues representa el valor del campo horizontal a una distancia de la cabeza igual a la mitad de la anchura del intervalo.



en el extremo posterior de una estructura diseñada para generar una sustentación aerodinámica cuando el disco gire bajo ella. Este mismo año, IBM ha introducido una memoria con estas cabezas.



CAMPO MARGINAL DE UNA CABEZA DE PELICULA DELGADA. La rapidez de su decrecimiento permite la escritura (y la posterior lectura) de datos con una mayor densidad de empaquetado en el disco. En particular, una cabeza Winchester puede grabar unas 4000 inversiones de la magnetización por centímetro a lo largo de una pista de datos. Una cabeza de película delgada alcanza a grabar 6000.

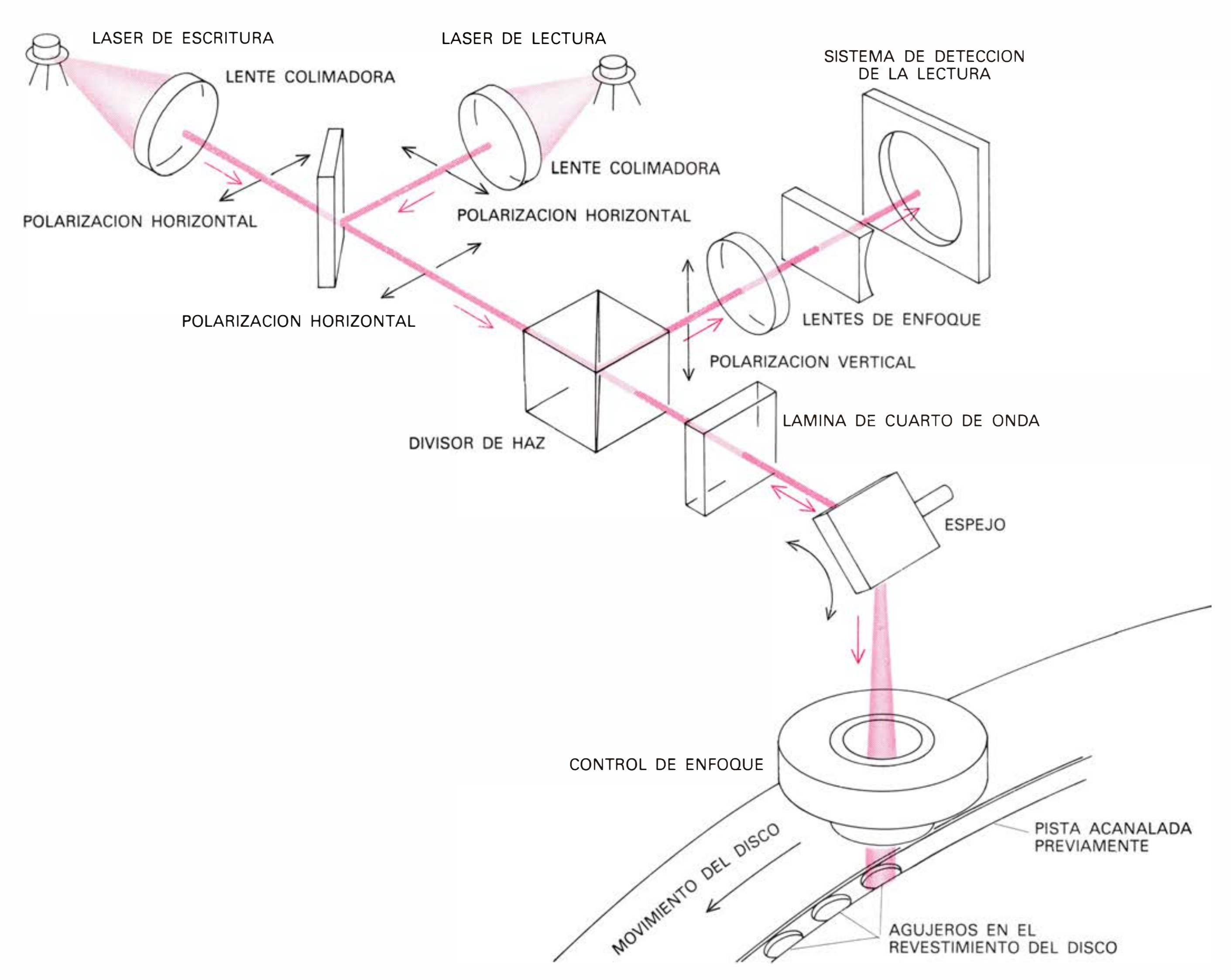
te adecuado para el caso de la corrección de ráfagas de errores, que es la forma usual de aparición de los errores en los discos magnéticos.

Los requerimientos del material magnético que constituye el núcleo del electroimán son muy diferentes. Aquí, un pequeño flujo de corriente a través de la bobina que rodea el núcleo debe originar una gran magnetización, y, al cesar el flujo de corriente, la magnetización debe acercarse todo lo posible a cero. Además, una inversión en la dirección del flujo de corriente hasta sólo un valor modesto ha de inducir una inversión en la magnetización. En muchas cabezas, el núcleo es una cerámica formada por partículas esféricas de ferrita. La ferrita es óxido de hierro con otro metal o mezcla de metales. En el caso de las cabezas magnéticas, los metales suelen ser níquel y cinc; algunas veces se añade manganeso.

El diseño de la cabeza debe ajustarse al diseño del disco. En una de las técnicas usadas el disco es "flexible": se trata de una fina lámina de plástico mylar con un revestimiento de óxido de hierro en su forma gamma. El diámetro usual del disco es de 20,3 centímetros, excepto en los minidiscos flexibles, cuyo diámetro mide 13,3 centímetros. En los discos y minidiscos flexibles, la cabeza entra en contacto real con la superficie del disco. A veces una mota de suciedad hace que la cabeza rebote de la superficie, lo que determina que el porcentaje de error de este dispositivo y el deterioro de su medio magnético sean relativamente altos, siendo necesario que el disco gire a pequeña velocidad.

En las memorias de alto rendimiento, el medio magnético reviste un disco rígido de aluminio de 20,2 o 35,5 centímetros de diámetro; se evita que la cabeza roce el medio magnético gracias a lo que se ha denominado efecto del cojinete de aire. Consideremos una cabeza que esté casi en contacto con la superficie de un disco de los de 35,5 centímetros, girando a 3000 revoluciones por minuto. La velocidad de la cabeza con respecto a las pistas de datos del medio magnético que reviste el disco es de unos 160 kilómetros por hora. Si la longitud de la cabeza a lo largo de la dirección del movimiento relativo es dos órdenes de magnitud mayor que la separación entre la cabeza y el medio, el flujo de aire entre ambos proporcionará el soporte suficiente para una cabeza que sólo pese algunos gramos.

En 1973, la International Business Machines Corporation introdujo la memoria de disco modelo 3340. Desde entonces, la tecnología de ese sistema ha sido adoptada por muchos fabricantes, y en la actualidad se conoce con el nombre genérico de tecnología Winchester, nombre clave bajo el que se desarrolló en IBM el dispositivo en



MEMORIA OPTICA DE DISCO, en su forma más simple, que emplea la luz láser para realizar agujeros quemando el revestimiento de un disco en rotación. El láser de escritura de los datos aparece en el extremo izquierdo. En la parte superior hay un láser para la lectura de los datos. Su luz se refleja en el disco en los lugares donde no se ha realizado un agujero y luego vuelve a pasar por el sistema óptico del dispositivo, llegando verticalmente polarizado a un divisor de haz que lo refleja hacia un sistema detector. La luz reflejada también contiene señales de información para el control de la pista y del foco.

cuestión. La memoria de disco Winchester tiene uno o más discos rígidos de 20,2 o bien 35,5 centímetros de diámetro. Cada disco está revestido por sus dos caras con un medio magnético, de forma que quedan dos superficies por disco disponibles para el almacenamiento de datos. Cada cabeza Winchester presenta tres raíles, o superficies en relieve. El extremo posterior del raíl central sostiene un núcleo magnético con una bobina arrollada a su alrededor para escribir y leer los datos. Los otros dos raíles gobiernan el flujo del aire. La fuerza resultante basta para soportar un peso de 10 gramos a una altura de medio micrometro por encima del disco. En una de tales memorias, los conjuntos de discos y cabezas están herméticamente cerrados dentro de una pequeña "habitación limpia": una cámara del tamaño aproximado de una sombrerera, por la que el aire circula y se filtra constantemente a fin de eliminar toda mota de polvo de diámetro mayor que 0,3 micrómetros.

La cantidad de datos que pueden almacenarse en un disco depende del tamaño de la zona de la superficie que se ha de magnetizar para guardar un bit. En primer lugar, la anchura de la región magnetizada, o equivalentemente la anchura de una pista de datos, viene condicionada por las limitaciones de la cabeza y el disco. Así, la anchura del raíl central de una cabeza Winchester queda limitada por su duración: el carril demasiado delgado es frágil. Esta limitación de anchura es de unos 20 micrometros, que corresponde a una densidad de pistas de alrededor de 400 por centímetro de radio.

En los discos flexibles, la densidad de pistas es sólo de algo menos de 20 por centímetro. La razón de ello estriba en que el plástico mylar del disco no se expande de forma homogénea al aumentar la temperatura y, por tanto, una pista de datos estrecha podría escaparse del ámbito de acción de la cabeza. En las memorias de alto rendimiento, el fabricante dedica una de las superficies del disco a modelos de bits que vayan proporcionando continuamente información sobre la posición de la cabeza. Cualquier desviación de la posición correcta motiva la generación de una señal en la cabeza que pone en acción un motor con el fin de alcanzar de nuevo la posición adecuada. Una nueva estrategia consiste en incluir estos modelos de bits dentro de los datos almacenados.

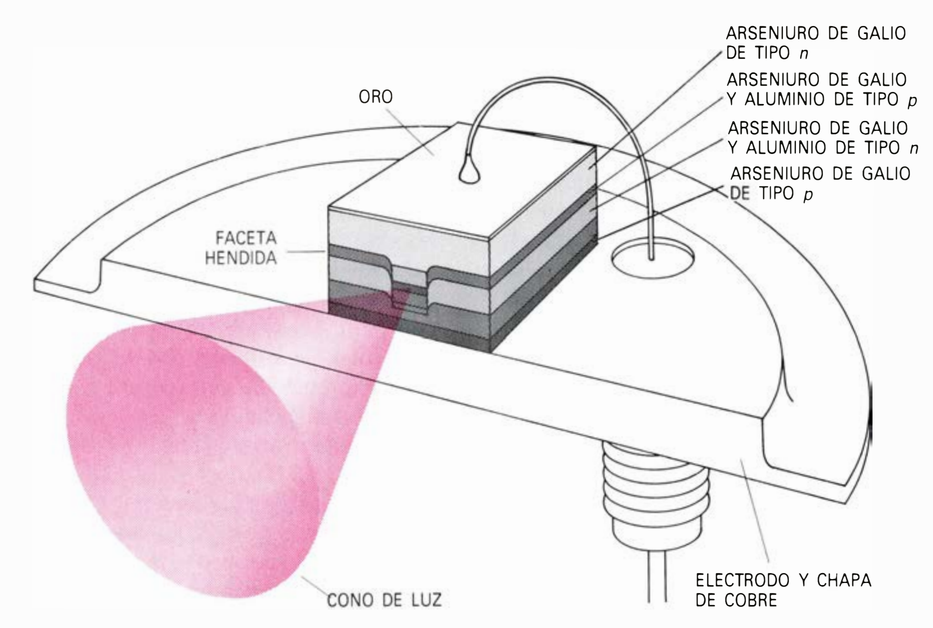
El número de bits que pueden escribirse en una pista viene determinado por las limitaciones impuestas por el disco y la cabeza. Por una parte, una inversión de la magnetización del medio no puede ser infinitamente abrupta, pues correspondería a una confrontación de polos magnéticos norte y norte (o sur y sur), y los polos iguales se repelen entre sí. Además, cuando las inversiones en la dirección del flujo de corriente a través de la bobina de la cabeza son demasiado rápidas no provocan la inversión del campo magnético de la cabeza. Así, las partículas de ferrita de una cabeza Winchester empiezan a dejar de responder a las inversiones del flujo de corriente a frecuencias del orden de 10 millones de inversiones por segundo. Debido a todas esas limitaciones, el número de inversiones magnéticas a lo largo de cada pista de datos en un dispositivo que almacene datos digitales por saturación magnética y que emplee una cabeza Winchester es de alrededor de 4000 por centímetro. La cantidad de datos guardados oscila entre unos 20 millones de bits para una superficie de un disco flexible y miles de millones de bits para los discos rígidos de alto rendimiento.

Se llama velocidad de datos a la rapidez con la que se leen o se escriben éstos a lo largo de una pista. Varía desde cientos de miles de bits por segundo, para los sistemas con discos flexibles, hasta diez millones de bits por segundo para los sistemas con discos rígidos. La principal causa de esa diferencia radica en el hecho de que los discos flexibles han de girar más lentamente. Los bits se escriben sobre los llamados sectores de pista. Cada sector tiene por lo general una longitud de centenares de bits. En un esquema su emplazamiento está marcado por una ranura a lo largo de un radio interno del disco.

La velocidad de localización de un sector particular, para efectuar una escritura o lectura de datos, viene medida por el tiempo de acceso. Se coloca la cabeza sobre la pista adecuada, lo que exige un "tiempo de búsqueda". Luego ha de quedar bajo la cabeza el sector apropiado de la pista, y ello requiere un "tiempo latente". Los tiempos de acceso típicos para las memorias de disco se sitúan entre 10 y 100 milisegundos.

Cada nuevo avance en las memorias de disco implica un sinfín de cambios en toda su tecnología. A pesar de ello, voy a describir ciertos posibles cambios como si pudiesen realizarse uno por uno.

A lo largo de los últimos veinte años, el desarrollo de los medios magnéticos de los discos tuvo puesta la mirada en el incremento de la densidad de partículas magnéticas y la homogeneidad de su tamaño, pero el material empleado siguió siendo la forma gamma del óxido de hierro. Más recientemente se han realizado esfuerzos tendentes a mejorar la coercitividad del medio (la resistencia de su magnetismo a borrarse) mediante modificación de la composi-



LASER DE SEMICONDUCTOR del tamaño de una cabeza de alfiler, que probablemente se empleará en la futura tecnología de discos ópticos. El dispositivo está formado por estratos de arseniuro de galio o de arseniuro de galio y aluminio, cada uno con impurezas que den al material un exceso de electrones (semiconductor de tipo *n*) o un exceso de «agujeros», que son estados de energía que pueden ocupar los electrones (semiconductor de tipo *p*). Al aplicar un voltaje, los electrones se mueven hacia abajo llegando a un fino estrato de arseniuro de galio de tipo *p* situado en el centro del láser. Allí se combinan con los huecos y liberan energía en forma de fotones: los cuantos de luz. Flanqueando la región emisora de luz se encuentran otros estratos de semiconductores cuyas propiedades eléctricas y ópticas impiden que los electrones y los fotones se desvíen lateralmente. Se ha logrado así una emisión láser de 80 miliwatt.

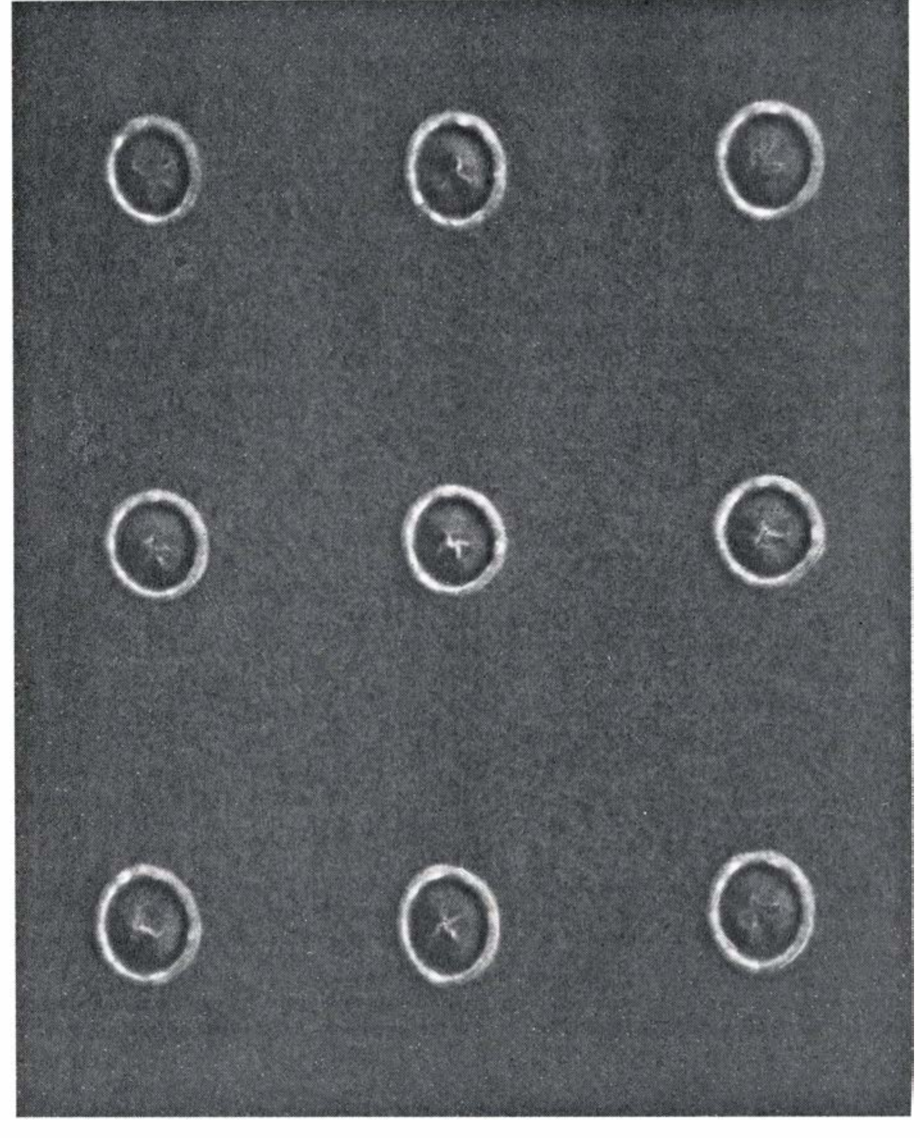
ción química de las mismas partículas. Resulta así que, si se añaden las partículas de óxido de hierro en la forma gamma a una solución que contenga iones de cobalto y luego se calientan, las partículas adquieren una delgada capa superficial de cobalto, lo que hace aumentar la coercitividad por algún mecanismo que no acabamos todavía de identificar. Se están empleando ya partículas de este tipo en las cintas magnéticas, pero aún no se han introducido para los discos, cuya elevada velocidad de rotación implica que el medio magnético sea extraordinariamente duradero.

Podemos elevar la magnetización del medio (y por tanto la intensidad de señal de lectura) empleando un material que adquiera una magnetización mayor que la del óxido de hierro. El cobalto metálico puro, por ejemplo, tiene una magnetización mucho mayor que la de la forma gamma del óxido de hierro; muchos grupos investigadores han construido discos recurriendo a él como medio magnético. En un nuevo método de fabricación, se aceleran iones de un gas inerte, típicamente argón, haciéndolos incidir sobre un blanco constituido por cobalto. En su bombardeo, los iones provocan la expulsión de átomos de cobalto, que se van depositando, por sí mismos, y cual una película, sobre un disco metálico. Controlando varios puntos del proceso, cabe manipular la estructura microscópica de esa película y, por tanto, sus propiedades magnéticas.

A la mera inercia económica hay que atribuir que se haya mantenido a tales discos fuera de la fabricación comercial. La producción de discos basados en el óxido de hierro requiere una técnica completamente diferente, en la que el medio magnético se aplica sobre la superficie del disco como una suspensión. Pero, además, las láminas delgadas no toleran los defectos del disco metálico que constituye su sustrato. También parecen ser menos duraderos que los discos de óxido de hierro. Por el contrario, la mayor magnetización del cobalto implica que el medio puede ser más delgado. De lo anterior resulta que el campo magnético de la cabeza varía menos a través del medio, y así las regiones magnetizadas adquieren una mayor definición. En particular, la longitud de la transición entre inversiones de la magnetización es más corta. La necesidad de densidades de memoria más altas para los datos reforzará el interés por los discos metálicos.

En su esfuerzo por mejorar las cabezas, los fabricantes de memorias de disco han empezado a explotar la tecnología de las películas delgadas, en las que se depositan estratos de materiales a través de un método de enchapado. En ese sentido, IBM introdujo recientemente una cabeza de película delgada en su memoria de disco modelo 3370. En ella, el circuito inductor no es una bobina de cable, sino una película delgada de conductor depositada en espiral, que da ocho vueltas sobre la superficie de un substrato de silicio que constituye el raíl de la cabeza. Lleva permalloy (una mezcla de níquel y de hierro) de núcleo magnético. La cabeza puede responder a inversiones de la corriente con frecuencias de 10.000 millones de veces por segundo. Además, la configuración del campo magnético creado por la cabeza permite registrar 6000 inversiones por centímetro a lo largo de una pista de datos. (Si el medio magnético fuese una lámina metálica, podrían alcanzarse las 10.000 inversiones por centímetro.) Sucede que la resistencia eléctrica del permalloy aumenta notablemente en presencia de un campo magnético. El grado de este incremento depende de la intensidad del campo magnético y no de su velocidad de cambio. En las futuras cabezas de película delgada, la lectura podría ser por tanto independiente de la velocidad de rotación del disco.

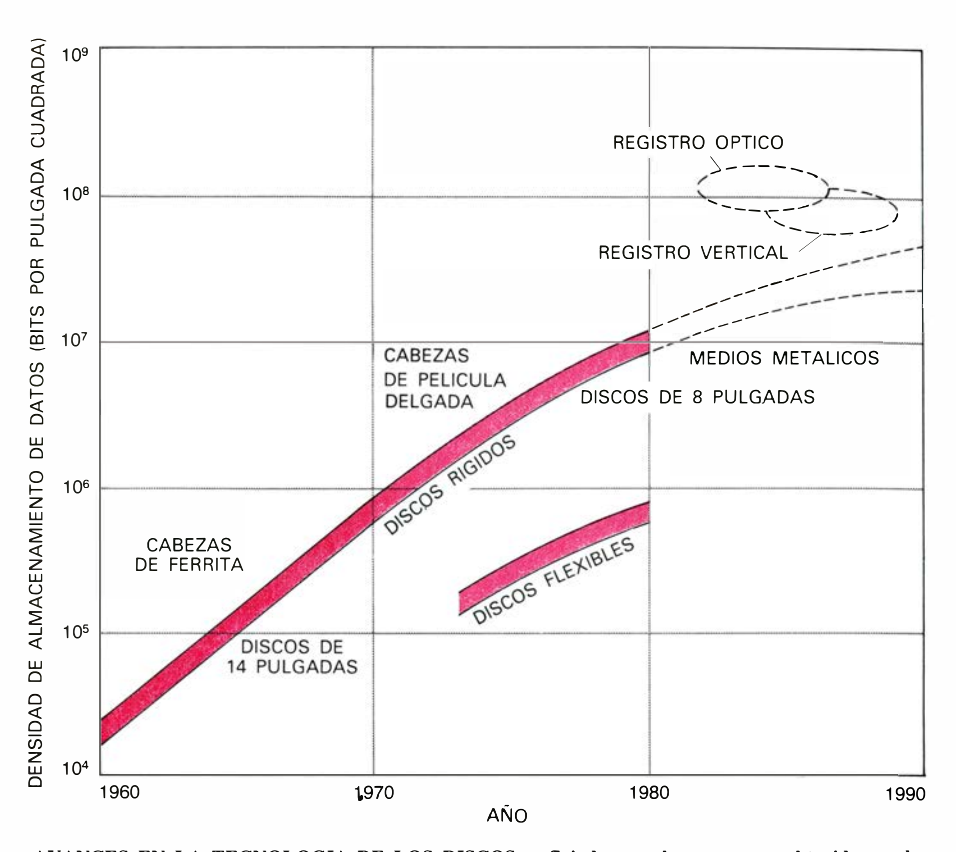
S. Iwasaki, de la Universidad de Tohoku, ha sugerido que los datos podrían almacenarse perpendicularmente al plano del disco. Aquí, el extremo del núcleo de una cabeza, y por tanto un polo de un campo magnético dipolar, queda enfrentado al disco y genera líneas de campo que se sumergen profundamente en el medio magnético. De ello resulta que los datos se almacenan, por así decirlo, de canto. Se podría llegar a las 400.000 inversiones por centímetro, pero su realización



AGUJEROS REALIZADOS quemando con un láser una delgada película de metal, en este caso teluro, mostrados en una micrografía electrónica. Para perforar cada agujero, el láser funde una región circular y vaporiza su centro. El metal se riza sobre sí mismo. La distancia entre agujeros es de 5 micrometros.

debe esperar el desarrollo necesario de la cabeza y del medio magnético. Mediante la técnica anteriormente descrita, los dipolos magnéticos del óxido de hierro pueden orientarse según el plano del disco. La dificultad radica en hallar un método mediante el cual tales dipolos puedan orientarse perpendicularmente al plano de un disco.

Incluso con todos los avances descritos, es inevitable que en las memorias magnéticas la energía responsable de la señal de lectura esté contenida en el propio medio. Dicho de otra forma, la intensidad de la señal de lectura depende de la intensidad de la magnetización remanente del medio. Las memorias digitales que empleasen energía emitida en forma de radiación presentarían la ventaja de que, para la lectura de datos, el mismo haz de la radiación proporcionaría toda la energía necesaria y los datos almacenados actuarían de "puertas". Una ventaja adicional sería que la cabeza que generase el haz no tendría que estar casi en contacto con el medio. Por lo que el medio podría hallarse encerrado para su protección, de suerte que podrían intercambiarse los discos sin tener que pagar el tributo de un incremento en el porcentaje de error. Los datos podrían almacenarse entonces a buen recaudo fuera de línea (fuera de memoria) por tan sólo el costo de los discos de las memorias.



AVANCES EN LA TECNOLOGIA DE LOS DISCOS, reflejados por los progresos obtenidos en la densidad de almacenamiento de datos, expresada en este gráfico como bits por centímetro cuadrado sobre la superficie del disco. En los discos rígidos, el medio magnético recubre un sustrato de aluminio; en los discos «flexibles» recubre un sustrato de plástico mylar. Son de prever dos mejoras en la tecnología de los discos magnéticos: el empleo de películas metálicas en sustitución del óxido de hierro como medio magnético, en los discos rígidos, y el almacenamiento de los datos en regiones de magnetización orientada verticalmente, es decir, perpendicular al plano del disco, y no horizontalmente como se hace ahora. Se espera que la naciente tecnología de los discos ópticos permita alcanzar la más alta densidad de almacenamiento. Un bit por pulgada al cuadrado equivale a 0,15625 bits por centímetro al cuadrado.

La posibilidad más simple para una memoria a la que se acceda mediante un haz de rayos es un dispositivo en el que un haz láser escribe los datos quemando pequeños agujeritos en el revestimiento del disco. Si el revestimiento consiste en una lámina metálica sobre un sustrato transparente, cada agujero transmitirá luz cuando se emplee luego el láser de menor potencia para la lectura de los datos. Donde haya metal plateado éste reflejará el haz de lectura. Para un láser cuya energía quede en la región del rojo del espectro electromagnético, se logran con facilidad agujeros de un micrometro de diámetro. En un disco de 35,5 centímetros de diámetro se pueden realizar diez mil millones de agujeros de ese tipo. Puede confiarse en que una memoria de este estilo será imborrable: los datos, una vez escritos, no podrán cambiarse. E incluso podría constituir una memoria de archivo en un sistema computador que incluyera también discos magnéticos.

Se obtiene una mayor pulcritud en los agujeros si éstos se realizan por ablación. El haz láser se focaliza hasta quedar reducido a una pequeña mancha sobre una película metálica delgada, y funde una zona pequeña de la película. En el centro de la mancha, donde el haz es más intenso, se abre un agujero todavía menor. Debido a la tensión superficial, el metal fundido adyacente se riza entonces sobre sí mismo para producir un borde toroidal. La energía que desencadena la ablación es la suma del calor que eleva la temperatura del metal y del calor que cambia su fase de sólido a líquido y, en el centro de la mancha, de líquido a gas. Por tanto, las propiedades deseables para el metal son una gran absorción de la energía para la frecuencia de la luz del láser y un bajo calor de fusión y de vaporización. Por otra parte, el medio no debe ser demasiado sensible al calor porque, de serlo, la lectura de los datos, que requiere cierta intensidad mínima de la luz láser, alteraría la información almacenada. Las propiedades de un metal, el teluro, son prometedoras, por lo que (al igual que otros muchos medios) se está estudiando en la Philips, RCA, Hitachi, Xerox, Thomson CSF y varias empresas más.

Supongamos que se desea escribir un agujero de un micrometro de diámetro sobre una película de teluro de 300 unidades angstrom (0,03 micrometros) de espesor. El pulso de láser que lo realice debe prolongarse el tiempo suficiente para calentar el metal, abrir un agujero muy pequeño por vaporización y mantener el metal fundido hasta que se forme el reborde. En esto último es en lo que se invierte más tiempo. La velocidad del reborde viene a ser de 1000 centímetros por segundo; un agujero de un micrometro de diámetro se abrirá, según eso, en unas cinco cienmillonésimas de segundo. Se necesita una potencia del láser de 20 miliwatt. Durante el tiempo que el láser está en acción, el disco avanza un micrometro aproximado, dando al agujero una forma elíptica. Un esquema para codificar los datos podría sacar partido de esta elongación. Así, los agujeros podrían superponerse para formar ranuras. En el "magnavisión", dispositivo fabricado por la Magnavox Company, que "lee" los discos ya grabados pero que es incapaz de realizar grabaciones, las variaciones en la longitud de los agujeros modulan un haz láser para producir una señal de imagen.

Los dispositivos como el magnavisión se basan en los láseres de gas, de

los que hasta los más pequeños resultan grandes y requieren mecanismos similares a un obturador para modular el haz. El rápido desarrollo de los láseres de semiconductor, mucho más pequeños, induce a pensar que van a reemplazar a los de gas en los sistemas de almacenamiento de datos. El láser de semiconductor más sencillo consta de dos estratos de material semiconductor, "impurificado" cada uno de un modo distinto con una pequeña cantidad de impureza y de suerte que las energías de los electrones de un estrato sean mayores que las de los electrones del otro. Cuando ambas capas están en contacto, los electrones cesan de fluir, pues sus movimientos iniciales establecen un campo electrostático que se opone a cualquier desplazamiento ulterior. Podemos vencer este campo aplicando un voltaje. Los electrones dotados de los valores energéticos más altos se mueven hacia el otro estrato, donde ceden su energía en forma de luz.

A renglón seguido, una cascada de sucesos origina el haz láser. En concreto, parte de la luz generada se propaga hacia delante y hacia detrás del semiconductor, donde se refleja en parte por superficies especulares. En virtud de esas reflexiones, la onda luminosa crece en amplitud, debido a que cada fotón, o cuanto de luz, interacciona con los electrones del semiconductor y motiva la emisión de fotones adicionales.

Que se sepa, los únicos semiconductores adecuados para la fabricación de láseres son el arseniuro de galio y sus aleaciones afines, cuya luz láser es roja o infrarroja. Esto representa un inconveniente para las memorias de disco, porque, para tales longitudes de onda, el teluro sólo absorbe débilmente. Por otro lado, los láseres de semiconductores están aumentando su rendimiento. Los estratos emisores de luz se están insertando entre estratos adicionales de semiconductor que reflejan los electrones en movimiento y los confinan así a zonas activas del dispositivo. Esos mismos estratos confinan también los fotones. Con tales diseños, en Hitachi han obtenido una emisión láser continua de 80 miliwatt con un láser experimental de semiconductor del tamaño de una cabeza de alfiler. Las propiedades del medio que reviste el disco pueden dejar de ser una barrera.

Alan E. Bell y Robert Bartolini, de la RCA, han propuesto otra posibilidad: un disco en el que el recubrimiento de teluro se coloque sobre un sustrato transparente de forma que el espesor del teluro y el sustrato sea un cuarto de la longitud de onda de la luz. Bajo el sustrato hay un reflector de aluminio. La luz reflejada por el aluminio estaría desfasada en media longitud de onda respecto a la luz reflejada por el teluro, y de este modo la interferencia destructiva entre ambas sería completa. Descrito de otra manera, el teluro aparece negro visto desde el lado del láser; por tanto, se absorbe toda la energía incidente, lo que contribuye al calentamiento del disco.

También se confía en poder inventar una memoria óptica de disco en la que los datos puedan borrarse y volverse a escribir. El proyecto para desarrollar tal memoria se funda en la interacción de un medio magnético con la luz. Para la escritura de los datos, se ha de calentar el medio por encima de su temperatura de Curie: la temperatura a la cual desaparece su magnetismo. A medida que el medio se va enfriando, se aplica un campo magnético, de suerte que, al reaparecer el magnetismo, éste toma preferentemente su orientación. La lectura de los datos exige que la luz debe reflejarse en el medio magnético o bien transmitirse a través del mismo. El magnetismo cambia ligeramente las características de la polarización de la luz. Para que el efecto sea máximo, la magnetización debe ser perpendicular al plano del disco. Esta es también la orientación requerida para el almacenamiento vertical propuesto por Iwasaki.

A finales de la década de 1960, IBM experimentó con una memoria óptica de disco, borrable, en la que empleaba óxido de europio como medio. Desgraciadamente, la temperatura de Curie de esta sustancia es menor que la temperatura ambiente, y en consecuencia había que refrigerar la memoria. Se investigaron luego las propiedades del manganeso bismuto, descubriéndose que sus átomos se reordenaban a la temperatura de Curie, por lo que la repetida escritura de datos degradaba el material.

La tecnología de los discos ópticos sólo acaba de empezar. Promete centuplicar la capacidad de los discos y reducir correspondientemente el costo de los datos almacenados. Esto no quiere decir que los discos ópticos vayan a reemplazar inmediatamente a sus precursores magnéticos. Las cabezas de película delgada y los medios metálicos, así como el almacenamiento vertical, aumentarán el rendimiento de los discos magnéticos. Quedan muchas cuestiones por resolver que afectarán a la integración de la tecnología óptica en los sistemas de computadores.


アイザック
ニウトン碩
學にして
誇らず

La manzana de Newton y el Diálogo de Galileo

Sin duda Newton vio caer la manzana, pero ¿qué le inspiró relacionar la caída de la manzana con la órbita lunar y llegar a la ley de la gravitación universal? Pudo haber sido un diagrama del "Diálogo"

Stillman Drake

En el último libro de su *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (Principios matemáticos de filosofía natural) desarrolla Isaac Newton la ley de la gravitación universal y muestra cómo esta ley explica la caída de los objetos a la Tierra, la órbita de la Luna, los movimientos de los planetas y el fenómeno de las mareas. ¿Cómo descubrió Newton esta potente ley? A un amigo le contó que le había puesto sobre la pista el ver caer una manzana de un árbol. Quizá, cuando observaba la manzana, se veía la Luna en el firmamento. Sea lo que fuere, se preguntó por qué la Luna no se alejaba de la Tierra o caía sobre ella como la manzana. Sabía que la fuerza de la gravedad se extendía sin disminución sensible a las cumbres de las altas montañas. Y puestos a extender su ámbito de aplicación, ¿por qué no a la Luna? Aun en el caso de que la famosa anécdota de la manzana sea verdadera, no explica, con todo, satisfactoriamente cómo llegó Newton a plantearse el problema de la Luna. Creo que lo que pudo haberle inspirado esta extensión de la gravedad a la Luna fue la lectura de unas páginas del *Dialogo sopra i due Massimi Sistemi del Mondo* (Diálogo sobre los dos máximos sistemas del mundo) de Galileo Galilei.

El problema de la Luna suscitó en Newton una serie de reflexiones en las que ocupaba un lugar destacado el problema de la disminución de la gravedad con la distancia. Hizo cálculos sobre la base de que esta disminución era proporcional al cuadrado de la distancia y constató que funcionaba con una "aproximación tolerable". Era 1666, la Universidad de Cambridge estaba cerrada a causa de una epidemia de peste y Newton se retiró a la finca familiar de Lincolnshire. Los datos que tenía no eran exactos y, de momento, dejó de lado el asunto. Esto sucedía veinte años antes de que desarrollara su teoría completa de la gravitación, piedra clave de la última parte de los *Principia,* titulada "El sistema del mundo", que unificaba la física terrestre y la celeste.

La anécdota de Newton y la manzana es bien conocida por todos y creo que por dos motivos muy dignos de tenerse en cuenta. El primero porque hace comprensible en términos de experiencia cotidiana algo que siempre ha sido un misterio. El segundo, quizás el más atractivo, porque hace ver que incluso los mayores logros de un gran genio pueden tener humildes comienzos accesibles a las mentes comunes. Esto nos infunde ánimos a la par que aumenta nuestra admiración por los hombres auténticamente innovadores.

Galileo, que murió en 1642, casi un año antes del nacimiento de Newton, reconoció que las grandes ideas surgen frecuentemente de fenómenos sencillos. Alabó a William Gilbert, quien en 1600 había considerado a la Tierra como un inmenso imán, por "habérsele ocurrido un concepto tan estupendo sobre algo que habían manejado innumerables hombres de gran talento sin que ninguno de ellos se apercibiera". Galileo sigue diciendo (por supuesto, traducido):

"No dudo de que con el tiempo esta nueva ciencia progresará con otras nuevas observaciones y aún más por medio de demostraciones verdaderas y concluyentes. Pero no por eso se ha de minimizar la gloria del primer observador. Yo no estimo menos, antes admiro mucho más, al primer inventor de la lira (por más que esté seguro de la tosca construcción del instrumento y de la forma aún más rudimentaria de tañerlo) que a cien artistas que en los siglos siguientes han llevado esta profesión a una sublime exquisitez... Entregarse a grandes invenciones partiendo de los más insignificantes comienzos y pensar que, bajo una apariencia trivial y pueril, pueden hallarse ciencias maravillosas no es propio de mentes adocenadas; son conceptos y pensamientos que sólo conciben los espíritus sobrehumanos."

Lo que Galileo escribió de Gilbert capta lo que la gente siente cuando oye hablar por primera vez de Newton, la manzana y la ley gravitatoria que une la Tierra y los cielos. Explica por qué poco después de que empezaran en serio los intercambios entre la cultura occidental y la oriental, hacia 1869, un artista japonés escogió la anécdota de la manzana de Newton para simbolizar la ciencia occidental. Sin embargo, cualquiera puede darse cuenta de que la simplicidad del importante descubrimiento de Newton es tan sólo aparente. Los hechos debieron ser en realidad mucho más complejos. Cuando la famosa manzana cayó había en la cabeza de Newton algo muy distinto de lo que había pasado por la mente de los otros en circunstancias parecidas. Sería provechoso saber qué podría haber sido; no digo "qué fue", ya que no hay forma de estar seguro, pero puedo sugerir algo que muy bien pudo haber sido.

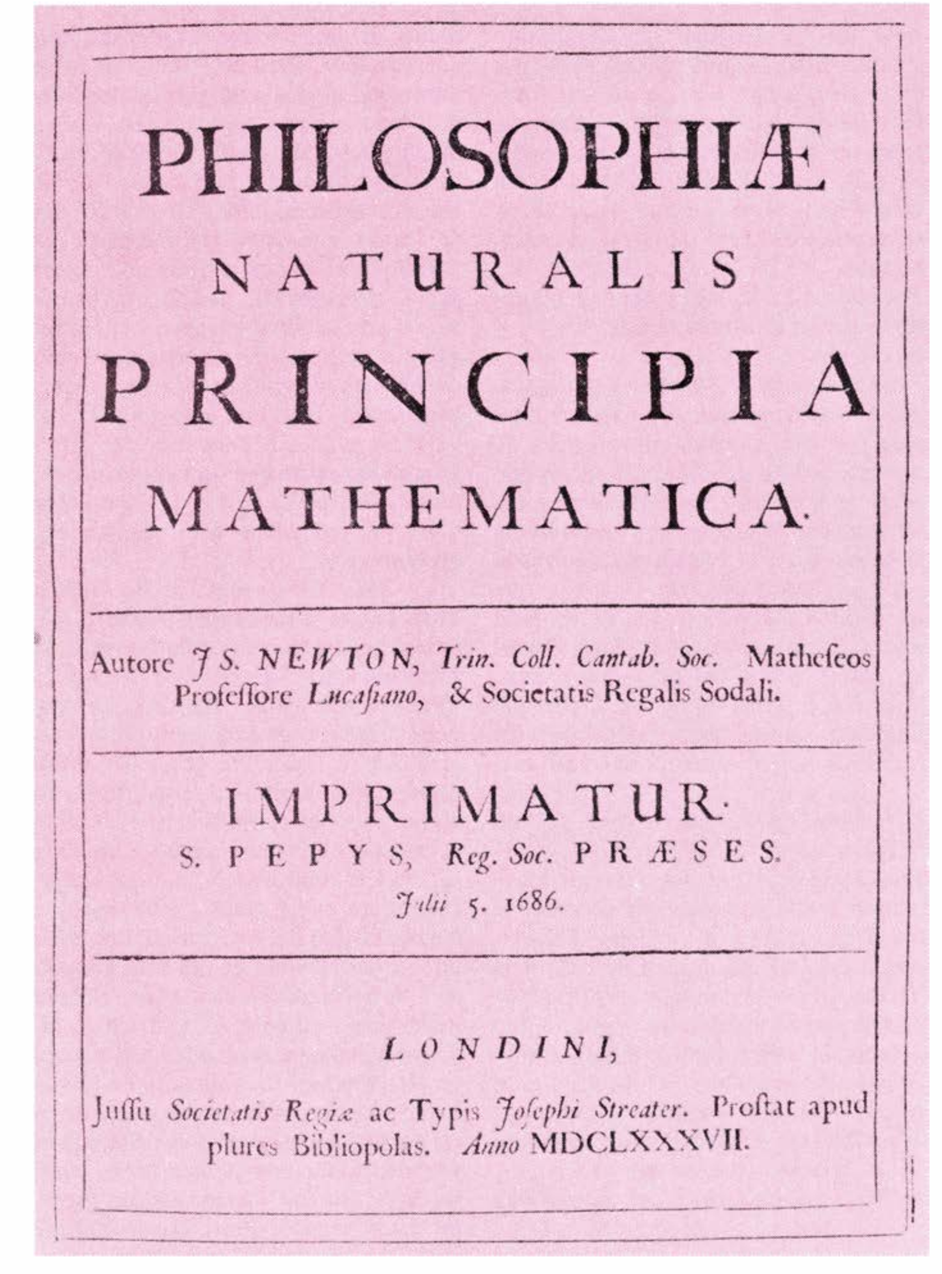
Los primeros apuntes de Newton sobre gravedad y dinámica no se han publicado hasta hace poco con la indicación de cuándo fueron escritos. En 1965 John Herivel, de la Queen's Uni-

GRABADO JAPONES de Newton contemplando la manzana. Formaba parte de una serie de grabados de grandes hombres de occidente. El artista, Hosai, eligió la anécdota de la manzana de Newton para representar la ciencia. La leyenda dice: "Isaac Newton, eminentísimo, y nada engolado, representante de una escuela". La lámina, acabada hacia 1869, forma parte de la colección del autor (S. Drake).

versity de Belfast, publicó *Background to Newton's Principia,* e I. Bernard Cohen, de la Universidad de Harvard, presentó un detallado estudio de las fuentes en las que Newton conoció la obra de Galileo. Herivel ha llegado a la conclusión de que Newton tomó la ley de inercia de los escritos de René Descartes. Y Cohen ha ofrecido pruebas convincentes de que antes de publicar los *Principia* en 1687 Newton no había leído de Galileo más que una traducción inglesa del *Dialogo*.

La ley de inercia fue fundamental para la primera investigación newtoniana sobre la órbita lunar, ya que Newton supuso que, si no actuaba una fuerza externa, un cuerpo grande como la Luna tendría un movimiento uniforme y rectilíneo. Trató de hallar la fuerza que impedía a la Luna seguir esa trayectoria. Y puesto que Galileo no mencionó nunca la ley de inercia, los historiadores de la ciencia han subrayado comprensiblemente la influencia de Descartes sobre Newton.

Sin embargo, tanto Herivel como Cohen reconocen que Newton había leído con anterioridad el *Dialogo*. Para 1666 Newton había tomado apuntes sobre la traducción inglesa publicada en Londres en 1661 por Thomas Salusbury. Hay en el libro una demostración que difícilmente pudo no haber suscitado el interés de Newton. Es más, el diagrama que acompaña a la demostración sugiere el tipo de análisis que Newton aplicó primero a la órbita de la Luna.



PHILOSOPHIÆ
NATURALIS
PRINCIPIA
MATHEMATICA.

Autore *JS. NEWTON, Trin. Coll. Cantab. Soc.* Matheſeos Profeſſore *Lucaſiano*, & Societatis Regalis Sodali.

IMPRIMATUR.
S. PEPYS, *Reg. Soc.* PRÆSES.
Julii 5. 1686.

LONDINI,

Juſſu *Societatis Regiæ* ac Typis *Joſephi Streater*. Proſtat apud plures Bibliopolas. *Anno* MDCLXXXVII.

PORTADA DE LOS "PRINCIPIA", opus magnum de Newton, en el que propuso la ley de gravitación universal. En esa época era profesor lucasiano de matemáticas en el Trinity College, Cambridge, y miembro de la Royal Society de Londres. El imprimatur, o licencia de publicación, lo signa Samuel Pepys en calidad de presidente de la Royal Society, con fecha de 5 de julio de 1686; salió a la luz al año siguiente. Los *Principia* se dividen en tres "libros". En el primero Newton desarrolla las tres leyes del movimiento. En el segundo analiza el movimiento en los fluidos. El tercero lo dedica a la gravedad.

Lo que Galileo pretendía probar no tenía nada que ver con la Luna. En realidad, Galileo no intentó nunca aplicar su física a los cuerpos celestes. Sólo se ocupó de cuerpos pesados que se mueven a distancias medibles cerca de la superficie de la Tierra. La demostración fue ideada para probar que ningún cuerpo pesado, en reposo sobre la Tierra, sería despedido violentamente por la rotación de la Tierra, independientemente del peso del cuerpo o de la velocidad angular de la Tierra. Para Herivel la prueba "no concluía" y hasta hace poco yo, junto con otros historiadores, opinaba que era ingeniosa pero falaz. No sorprende en lo más mínimo que en las discusiones en torno a Newton y la manzana se haya pasado por alto una prueba dudosa acerca de los cuerpos pesados en reposo sobre la superficie de la Tierra.

Con todo, he de hacer notar que lo que en un momento determinado ha podido orientar a un individuo en una determinada línea de pensamiento no es necesariamente algo que clara y espontáneamente esté relacionado con ella, y menos aún es algo que lleve a ella de forma natural y lógica. Quizá Newton utilizó un pasaje de Galileo, y en especial uno de sus diagramas, con un fin nunca imaginado por Galileo. Creo que esto fue probablemente lo que sucedió con el primer análisis de Newton del movimiento de la Luna alrededor de la Tierra. En la ilustración de la página 110 se puede ver el diagrama proyectado por Galileo para probar que un cuerpo pesado en reposo no podía salir despedido a lo largo de una tangente a causa de la rotación de la Tierra. Hizo el diagrama para refutar a sus contemporáneos, que pensaban que esto es lo que sucedería si la Tierra alcanzaba la velocidad angular de 24.000 millas/día o 1000 millas/hora.

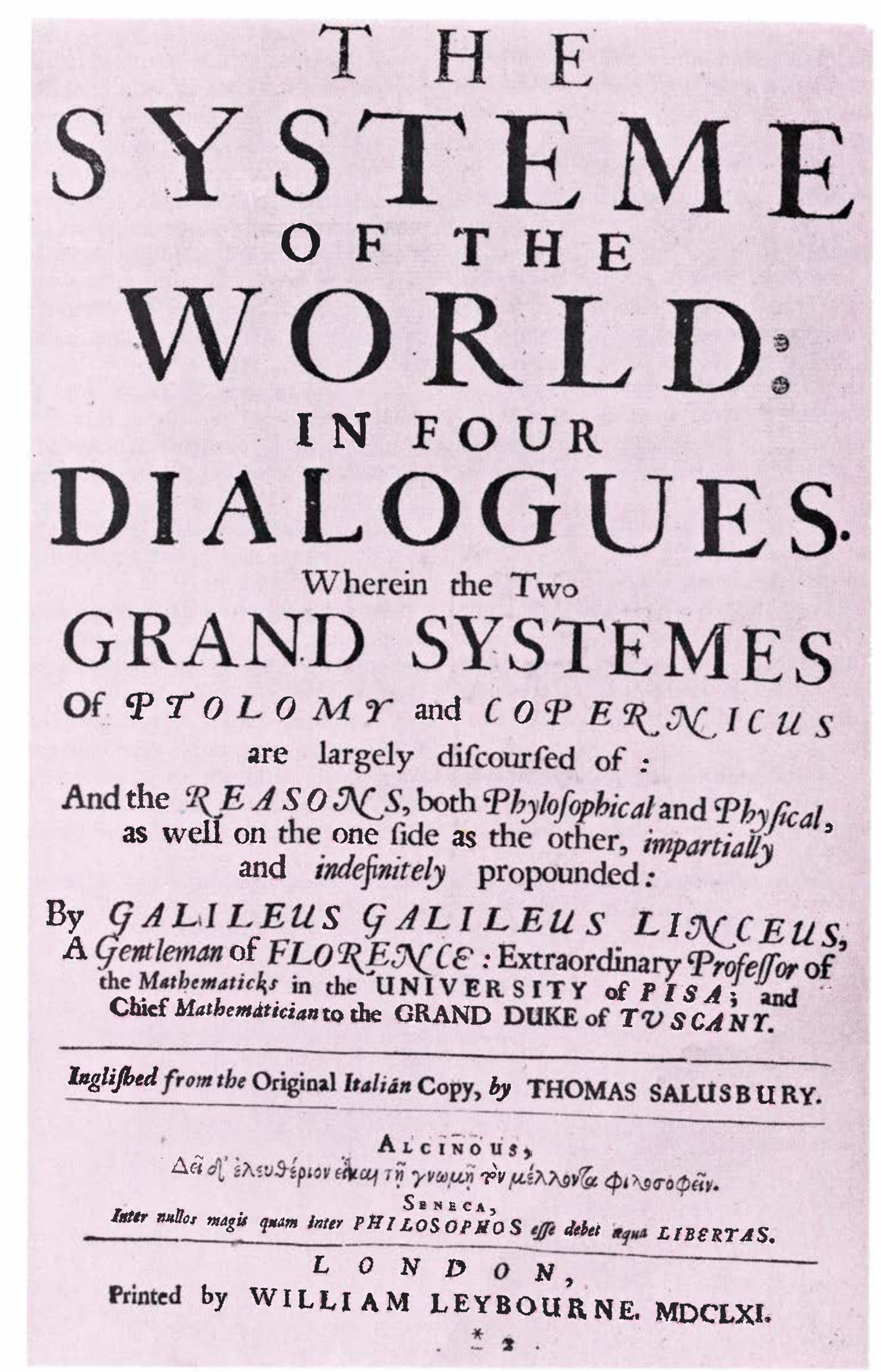
Galileo suponía que si, debido a la rotación de la Tierra, un cuerpo pesado en reposo en el punto A se viera despedido, éste se movería con movimiento uniforme a lo largo de la tangente AB. En tiempos iguales, el cuerpo recorrería horizontalmente distancias que serían proporcionales a los segmentos AF, FH y HK. En esos mismos tiempos, las velocidades de caída serían proporcionales a las verticales FG, HI y KL del triángulo rectángulo AKL. Galileo había probado que la distancia vertical recorrida por el

cuerpo en su caída no está en función del tiempo, sino del cuadrado del tiempo. Como sabemos, la regla del cuadrado del tiempo es su famosa ley de caída libre. Pero en este pasaje prefirió desarrollar su razonamiento sobre los cuerpos en términos de las velocidades con que caerían en tiempos determinados.

Galileo se apoya en la prueba de Euclides de que un ángulo "mixto" (formado por una recta y un arco de circunferencia) es siempre menor que un ángulo rectilíneo formado por esa recta y cualquier otra línea recta. En el caso concreto del diagrama: el ángulo (mixto) de tangencia entre AB y la superficie de la tierra (representada por el arco AP) es menor que cualquier ángulo rectilíneo que se pueda construir. Por consiguiente, si es que alguna vez el cuerpo pierde contacto con la Tierra, su velocidad descendente sería más que suficiente para reconducirlo sobre la superficie del globo.

Aunque formulado con otras palabras, el núcleo de la demostración de Galileo era el siguiente. Sea F un punto tan próximo a A como se quiera. Puesto que el cuerpo pesado en reposo en A no habría dejado la Tierra en el punto en que FG corta su superficie, se podría trazar una nueva tangente en ese punto. Se podría aplicar el mismo análisis a ese nuevo punto para probar que el cuerpo permanecería sobre la Tierra; volver a trazar una nueva tangente, y así sucesivamente. Cualquier ímpetu central que produce aceleraciones uniformes, tendría como resultado mantener por siempre sujeto al cuerpo en reposo independientemente de la velocidad de la Tierra o del peso del cuerpo, siempre y cuando éste pese. Galileo tuvo mucho cuidado en especificar que sólo hablaba de cuerpos pesados.

Los adversarios aristotélicos de Galileo creían que la velocidad de caída era proporcional al peso del cuerpo y por eso, en atención a ellos, incluyó la recta AD, que representa a un cuerpo más ligero. A continuación pasó a señalar que en realidad el peso no influía en la velocidad de caída y que había incluido la recta AD simplemente para convencer a sus oponentes de que, aun en el caso en que la velocidad de descenso dependiera del peso del cuerpo, éste nunca sería despedido a lo largo de la tangente como ellos suponían. Que Galileo incluyera esta consideración superflua hace aún más interesante su demostración a la luz de la dinámica newtoniana. Si la velocidad de giro de la tierra aumentara, el cuerpo en reposo perdería peso. Para una determinada velocidad de giro, su peso sería nulo (la posibilidad excluida por Galileo). Sin embargo, no sería despedido siguiendo la tangente. Empezaría a girar en torno a la Tierra, una vez alcanzada la velocidad orbital adecuada a ese radio.



THE
SYSTEME
OF THE
WORLD:
IN FOUR
DIALOGUES.
Wherein the Two
GRAND SYSTEMES
Of PTOLOMY and COPERNICUS
are largely difcourfed of :
And the REASONS, both Phylofophical and Phyfical, as well on the one fide as the other, impartially and indefinitely propounded:
By GALILEUS GALILEUS LINCEUS,
A Gentleman of FLORENCE : Extraordinary Profeffor of the Mathematicks in the UNIVERSITY of PISA; and Chief Mathematician to the GRAND DUKE of TUSCANY.

Inglifhed from the Original Italian Copy, by THOMAS SALUSBURY.

ALCINOUS,
Δεῖ δ' ἐλευθέριον εἶναι τῇ γνώμῃ τὸν μέλλοντα φιλοσοφεῖν.
SENECA,
Inter nullos magis quam inter PHILOSOPHOS effe debet æqua LIBERTAS.

LONDON,
Printed by WILLIAM LEYBOURNE. MDCLXI.

PORTADA DEL "DIALOGO". En 1666 Newton había leído la traducción inglesa de Thomas Salusbury, cuya portadilla recogemos aquí. La palabra Linceus inmediata al nombre de Galileo indica que éste pertenecía a la Academia dei Lincei, la primera estrictamente científica, fundada en Roma en 1603.

Caso de que la Tierra acelerara luego su giro, ello no afectaría a la velocidad del cuerpo que está en órbita, puesto que ya no estaría en reposo sobre la tierra. El resultado sería que el cuerpo empezaría a moverse en sentido opuesto al de la proyección (en el sentido BA). Mas la sola rotación de la Tierra no sería suficiente en ningún caso, como justamente señaló Galileo, para proyectar un cuerpo pesado a lo largo de la tangente. Es opinable si esta demostración es válida. Hoy sabemos que la conclusión de Galileo era correcta, ya que el propio movimiento de los cuerpos no puede alterar su común centro de gravedad (cuarto corolario de Newton a sus leyes del movimien-

to). En todo caso, tanto la física como la matemática de la demostración de Galileo habrían fascinado a Newton, en especial porque la comparación del ángulo de tangencia con un ángulo rectilíneo evoca en cierta manera el concepto de infinitesimales de orden superior del cálculo que Newton inventó.

Newton estudió el caso particular que había excluido Galileo: el de un cuerpo sin peso. Lo que convertía a la Luna en un cuerpo sin peso era precisamente un determinado radio orbital y una determinada velocidad. Los apuntes de Newton muestran que, en la época en que se ocupaba por primera vez de la órbita lunar, estaba investigando también la fuerza centrífuga. En el *Dialogo,* Galileo trata de la fuerza centrífuga tan sólo unas pocas páginas después de la demostración. Es, por tanto, muy plausible que el problema fundamental de Newton acerca de la manzana y la Luna le fuera sugerido por la lectura, todavía fresca, del *Dialogo*.

Quiero retornar ahora al origen de la ley de inercia, que, como Herivel mostró, Newton no había tomado de Galileo, sino de Descartes. Newton no podía haber tomado la ley del *Dialogo* porque en él no sólo no se la enuncia, sino incluso parece que se la niega en algunos pasajes. Con todo, en las páginas del *Dialogo* que preceden a la demostración Galileo añadió tres notas marginales sucesivas que expresan las tres condiciones que más tarde serían la base de la ley de inercia de Newton. Las notas, que figuraban en la traducción inglesa del *Dialogo* que había leído Newton, decían:

"El movimiento impreso por el proyiciente sigue una línea recta."

"El proyect[il] se mueve siguiendo la tangente al círculo del movimiento precedente en el punto de separación."

"Un proyect[il] pesado [grave], tan pronto como se separa del proyiciente, empieza a descender."

Las notas vienen a decir respectivamente que, si se lanza un cuerpo, el movimiento que se le comunica es exclusivamente rectilíneo; que, si se deja en libertad a un cuerpo que gira, éste sigue un movimiento rectilíneo a lo largo de la tangente en el punto de libertad; y que, si el cuerpo es pesado, empieza a caer tan pronto como queda libre. Dado que el diagrama de Galileo muestra que creía que el movimiento comunicado era uniforme, la discusión presentaba las tres condiciones de la ley de inercia de Newton: velocidad uniforme, rectilinearidad y efecto de desviación debido a otra fuerza (en este caso, el peso). Con todo, es verdad que Galileo no enunció ninguna ley universal de inercia como hizo Descartes, y que Newton tomó de éste la forma de su ley. Estas cuestiones merecen alguna aclaración.

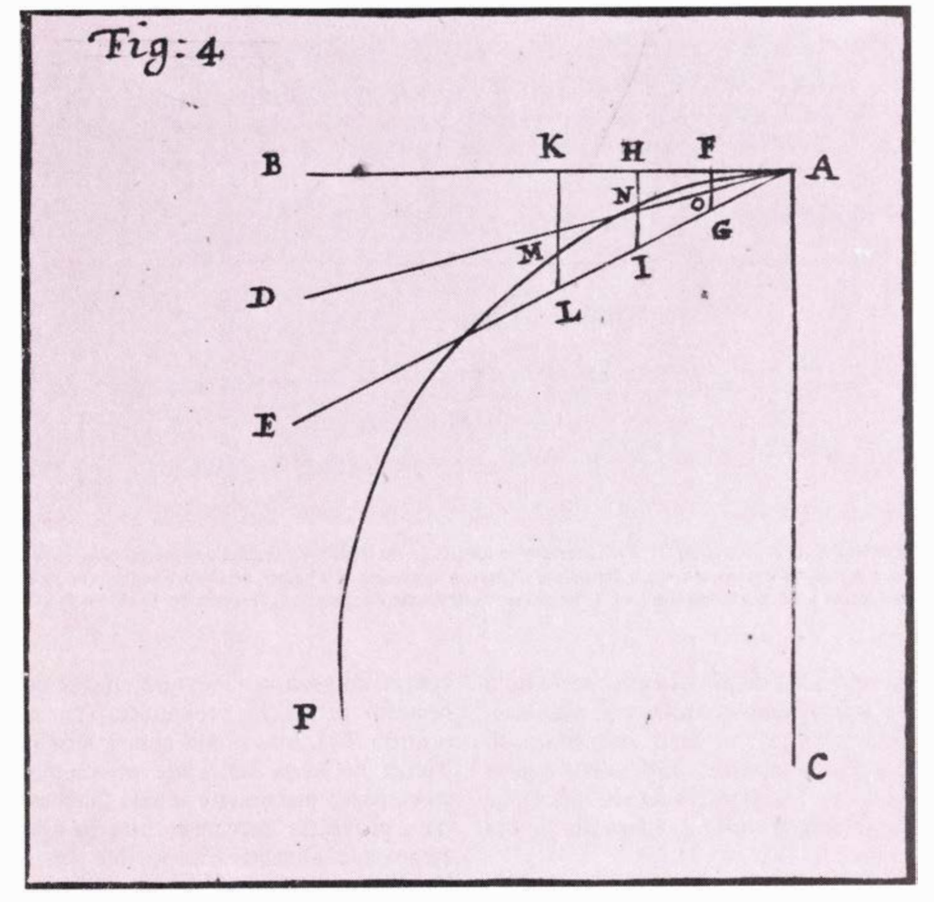


FIGURA 4 DEL "DIALOGO" que pudo haber inducido a Newton a preguntarse por qué la Luna no se alejaba de la Tierra ni caía en ella como la manzana. Con este diagrama pretendía demostrar Galileo que la sola rotación de la Tierra (representada por el arco *AP*) no era suficiente para proyectar fuera de ella a los objetos, y se apoyaba en la prueba de Eudides del ángulo "mixto". Apenas si interesa saber si la demostración es o no concluyente. Una prueba inválida pudo haber interesado a Newton, porque el caso de un cuerpo sin peso (caso del que Galileo no se ocupó) presentaba semejanzas con el de la Luna.

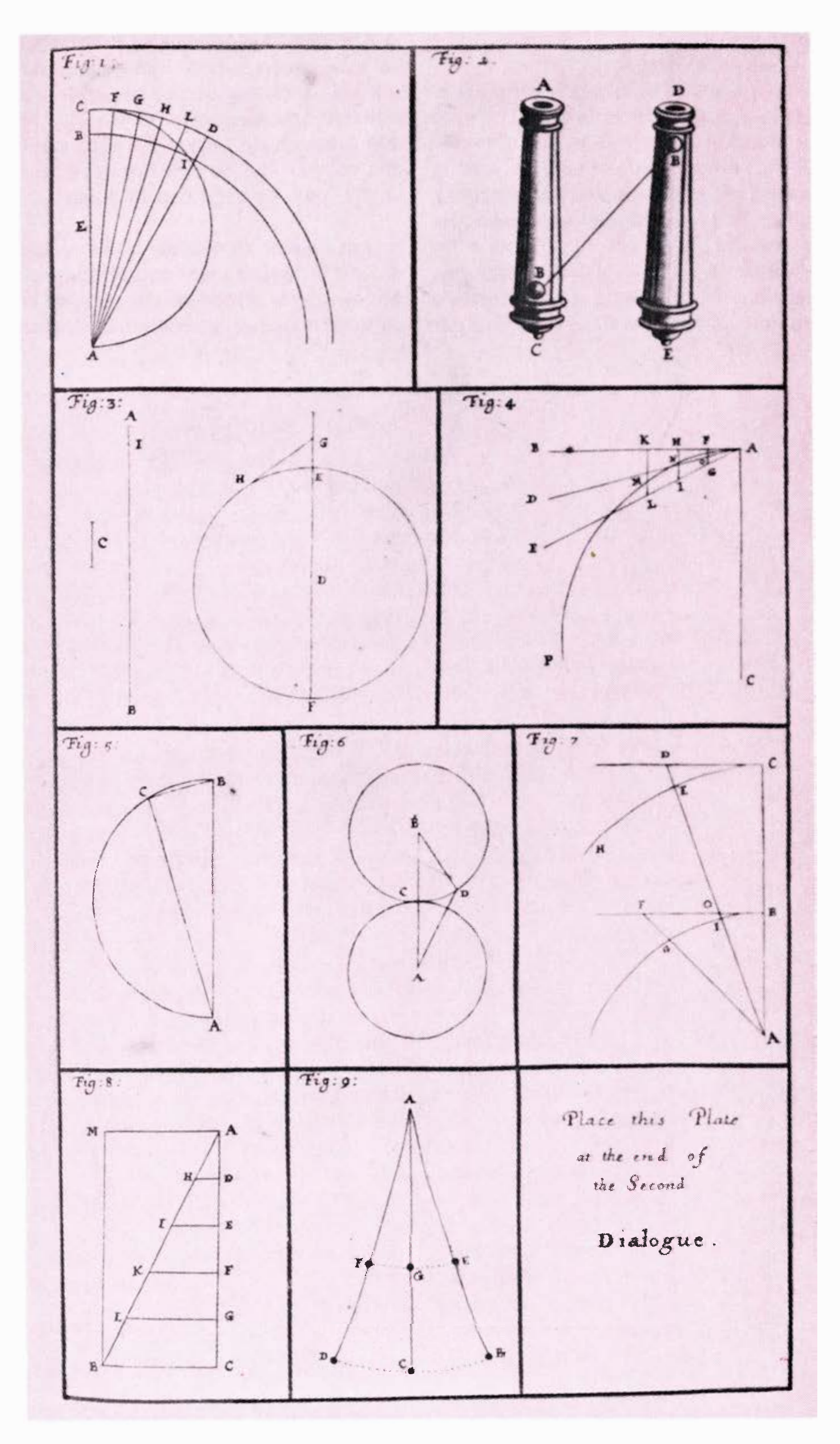
Galileo nunca enunció ningún tipo de ley física universal. Rechazaba la física tradicional de su tiempo sobre todo a causa de la tendencia a postular leyes universales sin prestar particular atención al mundo físico real. Negó explícitamente en el *Dialogo* que un cuerpo pudiera tener de hecho un movimiento rectilíneo uniforme y perpetuo, porque en ese caso podría salirse del universo. Descartes no conoció la ley de caída libre de Galileo y propuso un principio universal de movimiento rectilíneo uniforme, pero postuló, además, la existencia de unos vórtices de "materia sutil" que impedían a los cuerpos moverse de acuerdo con esa ley. La ley de gravitación universal de Newton excluía en principio el movimiento rectilíneo uniforme y perpetuo de un cuerpo pesado, ya que todo cuerpo estaba continuamente sometido a la atracción de otros cuerpos. Con Einstein desapareció sin más, del universo de la física, la recta euclídea. Se podría decir que en el campo de la inercia Galileo no tenía dificultades, Newton las eliminó del sistema de Descartes y Einstein mostró dónde había estado siempre la dificultad.

Cuando trato de adivinar lo que había en la mente de Newton al formular la fecunda pregunta sobre la Luna, no necesito especular sobre qué había en la mente de Galileo cuando forjó la física del *Dialogo.* No hay más que leer con atención el *Dialogo,* porque esto es lo que hizo Newton. Newton no veía en Galileo al filósofo confuso, que frecuentemente se contradice y hace hipótesis físicas impropias de un muchacho inteligente, sino que le consideraba un físico matemático competente. A Newton no le habrían desorientado algunos enunciados del *Dialogo,* que pueden parecer paradójicos. Por el contrario, habría examinado críticamente toda demostración física interesante del libro.

Creo que es un error suponer que formaba parte de la visión del mundo de Galileo la idea de que todos los movimientos impresos han de ser circu-

lares y no rectilíneos. No hay duda que reconoció excepciones, como lo prueban las anotaciones marginales antes citadas. Lo que dijo es que el movimiento especial que la rotación de la Tierra imprime a los cuerpos pesados es circular. "Siguiendo a la Tierra", escribió Galileo, se da un movimiento "indeleblemente impreso" en los cuerpos que están o han estado en contacto con ella. Hizo ver, por ejemplo, que un pájaro agita sus alas sólo para moverse con respecto a la tierra, no para mantenerse en su giro.

La demostración de Galileo de que los objetos no pueden ser proyectados fuera de la Tierra por el solo giro de ésta sólo muestra lo que pensaba acerca del movimiento circular especial de un cuerpo que "sigue a la Tierra". Para Galileo el movimiento no era puramente inercial en el sentido que se le da al término en la física moderna, sino que era el resultado de dos movimientos rectilíneos: uno inercial y otro hacia el centro de la Tierra. En nuestros días hay una cierta tendencia a generalizar este movimiento compuesto más allá del área a la que lo limitó Galileo. No se trataba de una pura "tendencia natural" al movimiento circular sino de un movimiento compuesto. Algunos historiadores han postulado una "inercia circular" como la idea fundamental galileana, sin especificar de qué círculo (o círculos) hablan. Probablemente Newton no leyó el *Dialogo* de la forma en que lo han hecho estos historiadores. De hecho, Newton concedió en los *Principia* que Galileo se había apoyado en la ley de inercia, aun cuando Newton había tomado el enunciado de la ley de Descartes, que fue el primero que le dio rango universal.



FIGURAS DE LA SEGUNDA JORNADA DEL "DIALOGO", entre las que se encuentra la figura anterior, a la que quizá dedicó Newton un detenido estudio. La 3 se refiere al tema de la rotación de la Tierra y su efecto sobre los cuerpos. Para los aristotélicos, la velocidad de caída dependía del peso.

Hay otro pasaje del *Dialogo* que debió suscitar la curiosidad de Newton. En el pasaje, el interlocutor Salviati expone las opiniones de Galileo, y, Simplicio, las de los aristotélicos contemporáneos.

"*Salviati:* Yo no he dicho que la Tierra no tiene un principio de movimiento circular ni externo ni interno; sino que no sé cuál de los dos tiene. Y esta ignorancia mía no tiene la fuerza de suprimirlo. Pero si ese autor [un anti-copernicano teutón] sabe por qué [tipo de] principio giran otros cuerpos del universo, y es cierto que se desplazan, entonces digo que lo que hace mover a la Tierra es algo semejante a lo que mueve a Marte y Júpiter, y lo que cree mueve también la esfera celeste. Y si él me asegura qué mueve a uno de esos cuerpos móviles, prometo que yo sabré decirle qué hace mover a la Tierra [alrededor del Sol]. Más aún, haré lo mismo si me puede mostrar qué es lo que en la Tierra hace descender a las cosas."

El último comentario es, sin duda, una profecía notable en boca de Galileo, porque es la promesa que básicamente cumplió Newton con su ley de gravitación universal. Sea lo que fuere lo que Galileo estuviera pensando, las palabras que publicó pudieron haberle sugerido a Newton el problema de la manzana y la Luna. No son menos interesantes las líneas que siguen del *Diálogo*.

"*Simplicio:* La causa de este efecto

es bien conocida; todo el mundo sabe que es la gravedad."

"*Salviati:* Os equivocáis, señor Simplicio. Lo que debéis decir es que todo el mundo sabe que se la llama 'gravedad'. Yo no os pido el nombre, sino la esencia de la cosa; y de esta esencia no sabéis un ápice más de lo que sabéis de la esencia de lo que hace girar a las estrellas, a excepción del nombre que se le ha asignado y que se ha convertido en una palabra corriente y familiar por la frecuente experiencia que tenemos de ella mil veces al día. Pero, en realidad, no sabemos más qué principio o fuerza hace caer a las piedras que lo que sabemos de lo que las hace subir una vez partidas de la mano del lanzador, o qué hace girar a la Luna..."

Para Galileo la ciencia, a diferencia de la filosofía, se concentraba menos en buscar principios o fuerzas de la naturaleza que en aprender todo lo que se pudiera de "experiencias sensibles y demostraciones necesarias". Por estas experiencias había descubierto la ley de la caída libre y la trayectoria parabólica de los proyectiles. Para Descartes, por el contrario, todo lo importante en la ciencia se derivaba de principios, y tituló a una de sus obras *Principia Philosophiae* (Principios de filosofía). Galileo llamó a su obra principal *Due Nuove Scienze* (Dos nuevas ciencias). El título del opus magnum de Newton, *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (Principios matemáticos de filosofía natural), se halla claramente entre ambas, ya que en aquella época se daba el nombre de "filosofía natural" a la ciencia física. En ella Newton enunció con claridad y precisión sus famosas tres leyes del movimiento: la ley de inercia, la ley de la fuerza y la ley de la acción y reacción. Hacía constar después en un escolio:

"Por las dos primeras leyes y los dos primeros corolarios, Galileo descubrió que la caída de los cuerpos pesados está en razón de los cuadrados de los tiempos y que el movimiento de los proyectiles es parabólico, confirmándolo la experiencia, a no ser en cuanto esos movimientos se retrasan un poquito debido a la resistencia del aire."

Si fue poco elegante por parte de Newton no añadir que Descartes había sido el primero en establecer la ley de inercia como un principio universal no lo fue más consigo mismo al no mencionar que era suyo el primer enunciado de la ley de fuerza. Galileo sólo había hablado de aceleración, no de fuerza, y tan sólo en relación con la caída de cuerpos pesados. Al identificar Newton, en su segunda ley, fuerza con aceleración y al hacer de la aceleración una medida universal de la fuerza, superó con mucho todos los pensamientos de Galileo. Naturalmente Newton lo sabía. Antes de que él desarrollara la dinámica, se pensaba que el concepto de fuerzas en la naturaleza era contradictorio en sí mismo: lo forzado no era natural, por definición. Supongo que Newton comprendió que Galileo, con el tratamiento matemático de la aceleración de los objetos que caían, había dado un primer paso hacia la dinámica que llegaría a conectar la física terrestre y la celeste. Si Newton empezó a desarrollar la dinámica al contemplar la manzana y la Luna, y si recordó que sus reflexiones se las había inspirado el *Dialogo* de Galileo, no es de extrañar que le pagara un tributo muy elevado. Puede que tuviera para con su predecesor italiano los mismos sentimientos que embargaron a Galileo ante su predecesor inglés, Gilbert.

176 G. GALILÆUS, *his Syſteme.*

and I will give you an anſwer. Tell me therefore, how much do you think ſufficeth to make that motion ſwifter than this?

SIMP. I will ſay for example, that if that motion by the tangent were a million of times ſwifter than this by the ſecant, the pen, yea, and the ſtone alſo would come to be extruded.

SALV. You ſay ſo, and ſay that which is falſe, onely for want, not of Logick, Phyſicks, or Metaphyſicks, but of Geometry; for if you did but underſtand its firſt elements, you would know, that from the centre of a circle a right line may be drawn to meet the tangent, which interſecteth it in ſuch a manner, that the part of the tangent between the contact and the ſecant, may be one, two, or three millions of times greater than that part of the ſecant which lieth between the tangent and the circumference, and that the neerer and neerer the ſecant ſhall be to the contact, this proportion ſhall grow greater and greater *in infinitum*; ſo that it need not be feared, though the *vertigo* be ſwift, and the motion downwards ſlow, that the pen or other lighter matter can begin to riſe upwards, for that the inclination downwards always exceedeth the velocity of the projection.

SAGR. I do not perfectly apprehend this buſineſſe.

A geometrical demonſtration to prove the impoſſibility of extruſion by means of the terreſtrial vertigo.

SALV. I will give you a moſt univerſal yet very eaſie demonſtration thereof. Let a proportion be given between B A [*in Fig.* 3.] and C: And let B A be greater than C at pleaſure. And let there be deſcribed a circle, whoſe centre is D. From which it is required to draw a ſecant, in ſuch manner, that the tangent may be in proportion to the ſaid ſecant, as B A to C. Let A I be ſuppoſed a third proportional to B A and C. And as B I is to I A, ſo let the diameter F E be to E G; and from the point G, let there be drawn the tangent G H. I ſay that all this is done as was required; and as B A is to C, ſo is H G to G E. And in regard that as B I is to I A, ſo is F E to E G; therefore by compoſition, as B A is to A I; ſo ſhall F G be to G E. And becauſe C is the middle proportion between B A and A I; and G H is a middle term between F G and G E; therefore, as B A is to C, ſo ſhall F G be to G H; that is H G to G E, which was to be demonſtrated.

SAGR. I apprehend this demonſtration; yet neverthleſſe, I am not left wholly without hæſitation; for I find certain confuſed ſcruples roſe to and again in my mind, which like thick and dark clouds, permit me not to diſcern the cleerneſſe and neceſſity of the concluſion with that perſpicuity, which is uſual in Mathematical Demonſtrations. And that which I ſtick at is this. It is true that the ſpaces between the tangent and the circumference do gradually diminiſh *in infinitum* towards the contact; but it is alſo true on the contrary, that the propenſion of the moveable to de-

PAGINA 176 DEL "DIALOGO", en la que empieza la original discusión que pudo haber inspirado la ley de la gravitación universal. La nota al margen dice: "Una demostración geométrica para probar la imposibilidad de extrusión [lanzamiento] por efecto de la rotación [*vértigo*] terrestre".

Juegos matemáticos

Del arte de encajar músicos, píldoras y puntos en casilleros apropiados

Martin Gardner

¿Sabría el lector demostrar que en España hay muchísimas personas que tienen el mismo número de pelos en la cabeza? ¿Y qué tiene que ver esta cuestión con el siguiente problema? En un cajón de la cómoda hay 60 calcetines, todos idénticos salvo en el color. De ellos, 10 pares son rojos, 10 pares, azules y 10 pares son verdes. Los calcetines están revueltos a más no poder, y el cuarto donde se encuentra la cómoda, completamente a oscuras. ¿Cuál será el mínimo número de calcetines que debemos tomar para estar seguros de sacar un par que hagan juego?

Fijémonos ahora en dos ejemplos no tan sencillos. ¿Sabría usted demostrar que expresando en forma decimal una fracción ordinaria a/b, el número resultante o bien tendrá un número finito de cifras, o bien comenzará a repetirse periódicamente, y que el número de cifras del período será menor o igual que b? ¿Podría el lector demostrar que situando con toda libertad cinco puntos en un triángulo equilátero de lado 1 habrá cuando menos dos de ellos no separados por más de 0.5? (Indicación: Se divide el triángulo en cuatro triángulos equiláteros menores, de lado 0.5.)

Estos problemas, y varios millares más pertenecientes tanto a las matemáticas serias como a las recreativas, tienen todos ellos una cualidad común: pueden resolverse aplicando un principio tan antiguo como fecundo, el llamado principio de clasificación o principio de encasillamiento, que algunos matemáticos prefieren llamar principio de Dirichlet, en honor de Peter Gustav Lejeune Dirichlet, un matemático alemán del siglo pasado. El principio de encasillamiento es el tema que nos ocupa este mes; la sección no ha sido escrita por mí, sino por Ross Honsberger, perteneciente a la Universidad de Waterloo y autor de *Ingenuity in Mathematics, Mathematical Gems y Mathematical Gems II;* además, ha editado las antologías *Mathematical Morsels* y *Mathematical Plums*. Estos cinco libros son todos ellos fuentes excelentes de insólitos problemas, todos con fuerte aroma recreativo. Todo cuanto sigue (menos los comentarios finales, que son míos) fue escrito por Honsberger, quien ha titulado así su análisis del principio de encasillamiento: "¿Cómo puede ser tan útil algo tan sencillo?".

Fijémonos en el enunciado: "Si dos enteros suman más de 100, al menos uno será mayor que 50". No parece que el principio de "superávit" subyacente a esta proposición sea otra cosa que una trivialidad. En su forma más sencilla, tal principio puede enunciarse así: Si tenemos que repartir $n + 1$ objetos (o más) en n cajas, alguna caja tendrá que recibir al menos dos objetos. Con mayor generalidad, si hay que distribuir $kn + 1$ (o más) objetos en n cajas, alguna de las cajas recibirá al menos $k + 1$ objetos.

Incluso en su forma más general, aplicado este principio a una colección de datos numéricos, no hacemos sino enunciar un hecho evidente, a saber, que es imposible que todos los valores estén por debajo, o todos por encima, de la media. Pese a su simplicidad, este principio es idea matemática de primera importancia y notable versatilidad. Examinaremos aquí siete de sus más llamativas y bellas aplicaciones de carácter elemental. Comenzaremos por un sencillo ejemplo geométrico.

1. Las caras de un poliedro. Hagamos la prueba de contar las aristas que contornean las caras de un poliedro. Se descubrirá que hay al menos dos caras limitadas por el mismo número de aristas. Para demostrar que siempre ocurre así, basta imaginar lo que sucedería distribuyendo las caras en una serie de cajas marcadas 3, 4, ..., n, colocando en la caja numerada r aquellas caras que tuvieran r lados. Puesto que las aristas son divisorias entre caras, una cara que tuviera el máximo número n de lados estaría en contacto con otras n caras; luego el poliedro debe tener al menos $n + 1$ caras. Por el principio de encasillamiento alguna caja tendrá que contener al menos dos caras, lo que demuestra la proposición. En realidad, es ejercicio sencillo demostrar que siempre habrá al menos dos pares distintos de caras con el mismo número de lados.

2. Diez enteros positivos menores que 100. He aquí una aplicación del principio del casillero capaz de desconcertar a más de uno. Independientemente de cómo se tome un conjunto S de diez enteros positivos menores que 100, siempre se podrán extraer de S dos subconjuntos totalmente diferentes (es decir, disjuntos, sin elementos comunes) que tengan la misma suma. Por ejemplo, en el conjunto 3, 9, 14, 21, 26, 35, 42, 59, 63, 76 tenemos los subconjuntos 14, 63 y 35, 42 cuya suma es en ambos casos 77; análogamente, el subconjunto 3, 9, 14 suma 26, que es uno de los números del conjunto.

Para comprender por qué siempre sucederá así, observemos que ningún subconjunto de S, ni aun tomando la totalidad de sus elementos, puede tener suma mayor que la de los 10 máximos números menores que 100: 90, 91, ..., 99. Estos suman 945; por ello, los subconjuntos de S pueden irse clasificando según la suma de sus números, adscribiéndolos a cajas rotuladas 1, 2, ..., 945. Dado que cada miembro de S o bien pertenece a un subconjunto prefijado, o bien no pertenece a él, el número de subconjuntos a clasificar (descontado el conjunto vacío, que carece de elementos) es $2^{10}-1$, es decir, 1023. Por el principio de encasillamiento, alguna caja debe contener (al menos) dos subconjuntos de S diferentes, que llamaremos A y B. Eliminando los números que puedan figurar repetidos en A y en B se obtendrán dos subconjuntos A' y B' sin

elementos comunes y con sumas iguales. En realidad, debido a que hay por lo menos 78 subconjuntos más que posibles sumas, cada subconjunto S debe generar docenas de pares de distintos subconjuntos con sumas iguales.

3. Tomar la píldora. Debemos esta nueva aplicación del principio de encasillamiento a Kenneth R. Rebman, matemático de la Universidad de California en Hayward. Un médico, que desea comprobar la eficacia de un cierto medicamento nuevo, indica a un paciente que debe tomar 48 píldoras a lo largo de un plazo de 30 días. El paciente tiene libertad para distribuir las tomas a su conveniencia, con tal de que ingiera al menos una todos los días y termine la dosis de 48 píldoras al cabo de los 30 días. Sin embargo, independientemente de lo que haga el paciente, habrá una serie de días consecutivos durante los cuales se ingerirán exactamente 11 píldoras. Más todavía, para todo valor de k comprendido entre 1 y 30, exceptuados 16, 17 y 18, siempre se podrá encontrar un período de días consecutivos durante los cuales se tomarán un total de k píldoras.

Para demostrar que un determinado valor de k es excepción de la regla, bastará hallar un reparto de tomas de las pastillas para el que no exista ningún período de días consecutivos durante el cual se tomen k píldoras. Así pues, los casos $k = 16$, $k = 17$ y $k = 18$ quedan eliminados de un plumazo por la siguiente distribución, donde se toma una píldora diariamente, a excepción del día décimosexto, en que se toman 19:

$$\underbrace{1\ 1\ \ldots\ 1}_{15}\ 19\ \underbrace{1\ 1\ \ldots\ 1}_{14}$$

Fijémonos ahora en el caso $k = 11$. Denotando por p_i el número total acumulado de píldoras ingeridas hasta el final del i-ésimo día, resulta que p_{30} es 48 y que los números positivos p_1, p_2, ..., p_{30} forman una sucesión estrictamente creciente $0 < p_1 < p_2 < \ldots < < p_{30} = 48$. (El signo "<" se lee "menor que"; una sucesión es estrictamente creciente cuando cada uno de sus elementos es mayor que su antecesor.) Sumando 11 a todos los números de esta sucesión se obtiene una nueva sucesión estrictamente creciente: $11 < < p_1 + 11 < p_2 + 11 < \ldots < p_{30} + 11 = = 59$.

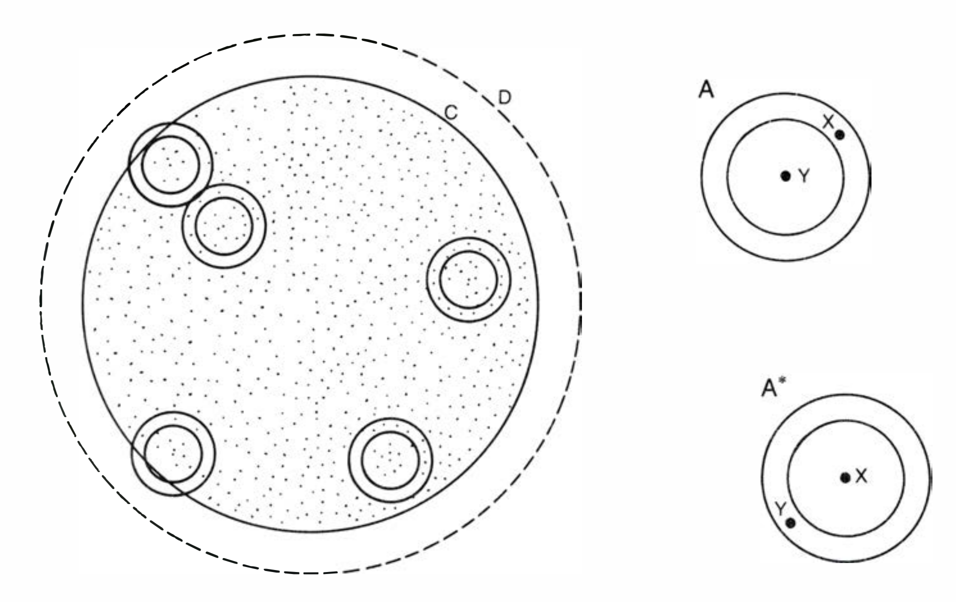
En la primera sucesión hay 30 números llamados p_i, y en la segunda, otros 30 de la forma $p_i + 11$. La totalidad de estos 60 números positivos son menores o iguales que 59. Por el principio de encasillamiento, al menos dos de ellos habrán de ser iguales. Por otra parte, no puede haber dos p_i que sean iguales, y tampoco pueden serlo dos $p_i + 11$. Así pues, algún número p_i debe ser igual que algún $p_j + 11$, esto es, $p_i = p_j + 11$ para ciertos valores de i y de j. Por tanto, $p_i - p_j$ es igual a 11, y ello significa que en los días consecutivos $j + 1$, $j + 2$, ..., i se tomaron exactamente 11 píldoras.

El razonamiento anterior es correcto para todo valor de k hasta 11 inclusive, y demuestra el enunciado para toda la sucesión de valores de k, de 1 hasta 11. Desembarazarse de los restantes casos es un poco más complicado; pero, de todas formas, el instrumento clave sigue siendo el principio de encasillamiento. Fijémonos ahora en los valores $k = 31$ hasta $k = 47$. Es cierto que para estos valores de k hay solución en muchos casos particulares, mas la siguiente familia de posibles repartos demuestra que ninguna de ellas puede garantizar una solución general. Cuando n se encuentra entre 1 y 17, el valor $k = n + 30$ es eliminado por la siguiente sucesión:

$$(19 - n)\ \underbrace{1\ 1\ \ldots\ 1}_{n+11}\ (n + 1)\ \underbrace{1\ 1\ \ldots\ 1}_{17-n}$$

Por ejemplo, cuando n sea igual a 7, la siguiente distribución de tomas elimina el caso $k = 37$.

$$12\ \underbrace{1\ 1\ \ldots\ 1}_{18}\ 8\ \underbrace{1\ 1\ \ldots\ 1}_{10}$$



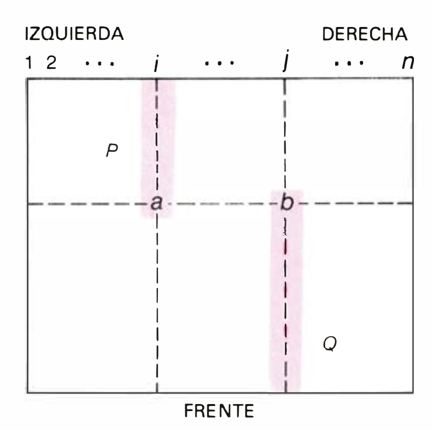
Seiscientos cincuenta puntos en un círculo

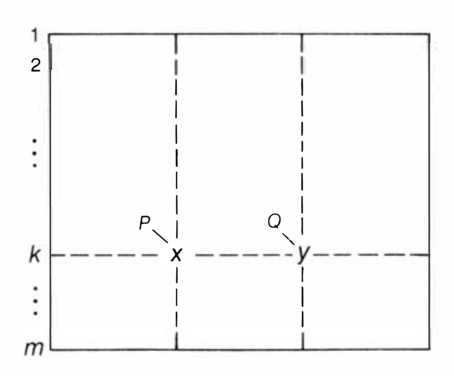
4. 101 números. De entre los números 1, 2, ..., 200 imaginemos elegido un conjunto de 101 números, a_1, a_2, ..., a_{101}. Sorprendentemente, resulta imposible elegir tal conjunto sin que contenga dos números que sean uno múltiplo del otro, es decir, sin que uno de ellos (el mayor), dividido entre el otro, dé cociente exacto y resto cero. Al demostrar este enunciado tendremos oportunidad de utilizar una notable forma de expresar números enteros.

Dado un entero positivo n podemos separar de él todos los divisores 2 que contenga, y expresarlo en la forma $n = 2^r q$, siendo q un número impar (tal vez igual a 1). Expresando de esta suerte todos los números a_i elegidos, se obtendrá un conjunto de 101 valores de q pertenecientes todos ellos al conjunto de los 100 números impares 1, 3, 5, ..., 199. Por el principio de encasillamiento, podemos concluir que dos de estos valores de q han de ser iguales. Por consiguiente, para ciertos valores de i y j, a_i es igual a $2^{r_i}q$, y $a_j = 2^{r_j}q$. De estos dos números, es evidente que el de menor potencia de 2 divide al otro.

Procediendo análogamente, no resulta difícil aplicar el principio de encasillamiento y demostrar que, en cualquier conjunto S formado por 102 números tomados del conjunto 1, 2, ..., 200, habrán de existir dos números distintos cuya suma sea un tercer número de S (ahora no es necesario emplear la notación $2^r q$). Seguidamente, me fijaré en dos impresionantes aplicaciones del principio de encasillamiento en contextos geométricos.

5. Seiscientos cincuenta puntos de





Demostración del teorema del desfile

un círculo. Tomemos un círculo de radio 16, y un anillo o corona circular de radios exterior e interior 3 y 2, respectivamente. Rociemos el disco con un conjunto S formado por 650 puntos. ¿No es sorprendente que siempre el anillo pueda situarse sobre el disco de forma que recubra al menos 10 de dichos puntos? Para poner de manifiesto la veracidad de semejante afirmación, podríamos colocar 650 copias o reproducciones del anillo sobre la región limitada por el círculo, siendo cada punto de S centro de uno de los anillos, como sugiere la figura del lado izquierdo de la ilustración de la página precedente. Cuando los puntos de S estén cercanos a la circunferencia del disco C, los anillos correspondientes se saldrán del círculo. Ahora bien, un círculo concéntrico con C que tuviera 19 unidades de radio (el radio de C más el radio exterior del anillo) englobaría a todas las anteriores copias de A. Llamemos D a este nuevo disco, y observemos que su área es $\pi\ 19^2$, o sea, $361\ \pi$. Por otra parte, como el área de A es $\pi\ 3^2 - \pi\ 2^2$, es decir, $5\ \pi$, resulta que las 650 copias de A tendrán una suma de áreas igual a $3250\ \pi$.

En esta tesitura podemos aplicar una versión "continua" del principio de encasillamiento. Al colocarla sobre el disco D, cada copia de A recubre una cierta región de esta figura. Supongamos situadas en su lugar las 650 copias de A, e imaginemos que ninguna parte de D quedara cubierta por más de nueve copias distintas del anillo A. En tal caso, el área total de las 650 copias no podría rebasar nueve veces el área de D. Pero esto no puede suceder, pues $9\ (361\ \pi)$ es solamente $3249\ \pi$, mientras que la suma de las áreas de los anillos es $3250\ \pi$. El principio de encasillamiento requiere entonces que algún punto X de D haya de estar recubierto por al menos 10 copias de A.

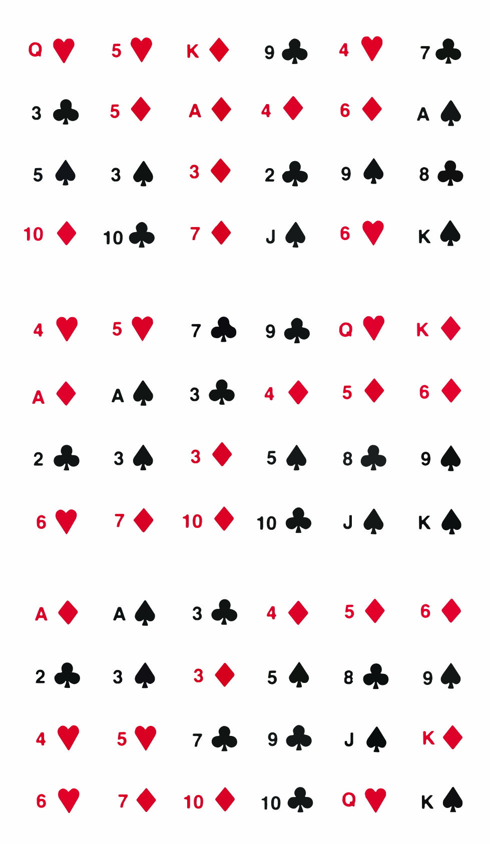
Supongamos que Y sea un punto de S situado en el centro de una de estas 10 copias de A. La distancia desde X hasta Y tiene que ser mayor que el radio interior de A, y menor que su radio exterior. Por ello, como muestra la parte derecha de la ilustración de la página precedente, otra copia de A, trazada esta vez con centro en X cubriría a Y. Llamemos A^* a esta copia de A. Puesto que hay al menos otros nueve centros con la misma propiedad que Y, A^* cubrirá por lo menos 10 puntos de S, y con ello queda demostrado el enunciado. (Este problema fue propuesto por Viktors Linen, de la Universidad de Ottawa, en *Crux Mathematicorum,* vol. 5, pág. 271; noviembre de 1979.)

6. El desfile de la banda. Nuestro siguiente ejemplo se refiere a una banda de música, que desfila en formación rectangular de m filas y n columnas. El director, que la observa desfilar desde el flanco izquierdo, se da cuenta de que algunos de los músicos más bajos se encuentran dispersos por la formación. Para corregir tal falta de estética, decide organizar los músicos en cada fila por orden de estaturas no decrecientes desde la izquierda hacia la derecha, con lo que cada miembro de la banda tendrá estatura mayor o igual que el situado a su izquierda. Empero, cuando el director miró la formación desde el frente volvió a encontrarse con algunos de los menos altos camuflados todavía en el interior de la formación. Procedió entonces a permutar los músicos dentro de cada columna, para situarlos por orden no decreciente de estaturas de cabeza a cola de la formación. Se pregunta entonces si no debería regresar al flanco izquierdo, para comprobar si los reajustes por columnas han perturbado o no las filas que tan cuidadosamente ha ordenado. Afortunadamente, al hacerlo queda gratamente sorprendido al ver que las filas siguen correctamente ordenadas por estaturas no decrecientes, de izquierda a derecha. Al permutar entre sí miembros de una misma columna en la forma explicada no se destruye la ordenación no decreciente de las filas.

Este extraño suceso puede demostrarse indirectamente, suponiéndolo falso y llegando a una contradicción. Dicho de otra forma, supondremos que tras haber organizado cada columna exista una fila donde un músico, a, más alto que otro, b, quede situado por delante, es decir, más a la izquierda que éste. Llamemos i a la columna del más alto de ambos, a, y j a la columna del más bajo, b, como podemos apreciar a la izquierda de la ilustración de esta misma página. Puesto que cada columna acaba de ser ordenada, podemos suponer que todos los músicos del segmento P de la columna i, desde a hacia atrás, son al menos tan altos como a, y que cada músico del segmento Q de la columna j, desde b hacia adelante, no es más alto que b. Además, como a es más alto que b, se sigue que todo miembro de P es más alto que todo miembro de Q.

Fijémonos ahora en la situación intermedia, cuando las filas han sido ya ordenadas, pero las columnas no. Para regresar a este punto es preciso devolver los músicos del segmento P a sus posiciones iniciales dentro de la columna i, y lo mismo con los del segmento Q dentro de la columna j. Dicho de otra forma, los miembros de P y Q serán distribuidos por las filas 1, 2, ..., m, como si las m filas fueran otras tantas cajas. Ahora, los segmentos P y Q tienen longitud total $m + 1$, es decir, que hay un total de $m + 1$ músicos entre ambos segmentos. Por el principio de encasillamiento, dos de ellos habrán de encontrarse en la misma fila. Es imposible que ambos procedan del mismo segmento, y por tanto, en alguna fila debe existir un músico x perteneciente al segmento P de la columna i que se encuentre situado a la izquierda de un miembro y del segmento Q de la columna j, como vemos a la derecha de la ilustración de esta misma página. Dado que x es más alto que y, esta disposición violaría la ordenación por estaturas no decrecientes ya establecida para las filas. La conclusión resulta por contradicción.

7. Subsucesiones de una permutación. Este último ejemplo sirve para establecer una preciosa propiedad de toda ordenación de los números 1, 2, ..., $n^2 + 1$ en una hilera. Al ir inspec-



Comprobación del teorema

cionando de izquierda a derecha una cualquiera de estas ordenaciones o permutaciones de la sucesión, vemos que ésta ha de contener ya sea una subsucesión creciente de longitud $n + 1$ (cuando menos), ya una subsucesión decreciente de longitud (al menos) $n + 1$. Por ejemplo, para n igual a 3, la permutación 6, 5, 9, 3, 7, 1, 2, 8, 4, 10 contiene la subsucesión decreciente 6, 5, 3, 1. (Como este ejemplo pone de manifiesto, no es preciso que las subsucesiones estén formadas por elementos consecutivos de la hilera.)

Podemos demostrar fácilmente el aserto de que toda permutación contiene una subsucesión de esta naturaleza especificando que, para cada número i de la hilera, x representa la longitud de la subsucesión creciente más larga que comienza por i, e y denota la longitud de la subsucesión decreciente más larga que comienza por i.

De esta forma, a los $n^2 + 1$ números de la hilera podemos asignarles otros tantos pares de "coordenadas" (x,y). Si podemos demostrar que siempre existe un valor de x o un valor de y al menos igual a $n + 1$, el aserto estará demostrado. Por el contrario, si para alguna ordenación todos los valores de x y todos los valores de y fuesen menores o iguales que n, sólo habría (a lo sumo) n^2 posibles pares (x,y) diferentes. En este caso, el principio de encasillamiento exigiría que algún par (x,y) hubiera de ser sistema de coordenadas para al menos dos números distintos de la hilera, i y j. Ahora, i no es igual a j, y de ser menor, la coordenada x de i sería mayor que la de j, mientras que si fuera i mayor que j, entonces la componente y de i sería mayor que la de j. En cualquiera de estos casos resulta una contradicción, y por ello, el aserto queda demostrado.

Para cerrar el tema propondremos tres ejercicios, con lo que sin duda disfrutará el lector. Daremos las soluciones el mes que viene.

1. Se llaman puntos reticulares a los puntos del plano coordenado cuyas abscisa y ordenada son ambas números enteros. Demostrar que elegidos arbitrariamente cinco puntos reticulares del plano, al menos uno de los segmentos que unen por pares estos puntos ha de pasar por algún punto reticular del plano.

2. Se sitúan en el plano seis círculos (cerrados, es decir, con sus circunferencias) de forma que ninguno de ellos contenga al centro de ninguno de los demás. Demostrar que tales círculos no pueden tener ningún punto común.

3. Demostrar que en toda hilera de $mn + 1$ números reales distintos ha de poderse encontrar, o bien una sucesión creciente de longitud al menos $m + 1$, o bien una sucesión decreciente de longitud al menos $n + 1$.

El resultado que Honsberger analiza con una formación de músicos, y que tan contrario resulta a la intuición, puede comprobarse de forma muy llamativa con ayuda de una baraja. Mezclemos las cartas y repartámoslas en una matriz rectangular, pongamos por caso, de cuatro filas de seis cartas cada una, como muestra la ilustración de esta misma página

Seguidamente, ordenemos los naipes de forma que sus valores, observados de izquierda a derecha, nunca decrezcan, como se ve en el centro de esa misma ilustración. (Por ejemplo, una ordenación aceptable es 6, 7, 10, 10, *J*, *K*.) Ahora reordenemos cada columna, de forma que los valores de los naipes nunca decrezcan al ir bajando por cada columna, como se muestra abajo. Al permutar las cartas de cada columna, es evidente que cambian las cartas en ciertas filas, pero observaremos que aun después de ordenar las columnas las filas continúan estando ordenadas.

Hace algunos años, una revista de ilusionismo publicó un truco de naipes basado en este sorprendente descubrimiento. (*The Pallbearers Review*, pág. 513, abril, 1972.) Se dan cinco manos de póker. A continuación se ordenan las cartas de cada mano, dejando los cinco naipes en orden creciente de atrás hacia delante. Se reagrupan las manos, apilándolas unas sobre otras por un orden cualquiera, y se vuelven a dar cinco nuevas manos, boca abajo, de la manera habitual. Las manos serán totalmente distintas y no estarán ordenadas. Se explica entonces a los espectadores que nos proponemos enseñar a las cartas a ordenarse por sí solas. Se recoge cada mano, se vuelven a ordenar sus naipes, dejando la mano boca abajo, y se reagrupan las manos, colocando la quinta (correspondiente al que reparte) sobre la cuarta, éstas dos sobre la tercera, y así sucesivamente. Volvemos finalmente a dar las cartas, siempre por el procedimento habitual; para entonces, las cartas ya se habrán aprendido la lección: pese a que las manos volverán a ser distintas, cada mano estará ya ordenada.

Este resultado pertenece a la teoría de "tablas de Young" que son una clase de cuadros de números así llamados en honor de Alfred Young, clérigo inglés que los ideó y analizó en un artículo publicado en 1900. Se ha demostrado que estos cuadros tienen importantes aplicaciones en mecánica cuántica. En los primeros años 60, el problema de la banda de músicos fue presentado en varias revistas de matemáticas, aunque bajo diversas apariencias. David Gale y Richard M. Karp dedicaron una monografía al tema, titulada "The Nonmessing-up Theorem", que fue publicada en 1971 por el centro de investigación operativa de la escuela de ingeniería de la Universidad de California en Berkeley.

Damos ahora las soluciones a los problemas sobre juegos de tablero lineal propuestos el mes pasado.

En las damas sobre línea de 11 cuadros (con las negras situadas inicialmente en los cuadros 1, 2, 3 y 4 y las blancas en los 8, 9, 10 y 11) los dos primeros movimientos son forzados: las negras pasan a 5, y las blancas, a 7. Para evitar perder, las negras juegan entonces a 4, y las blancas han de responder moviendo a 8. Entonces, las negras están forzadas a jugar a 3, y las blancas, a 9. En este momento, las negras pierden si juegan al 2, pero ganan si juegan a 6. En el último caso, es obligado que las blancas jueguen a 5, y

entonces las negras saltan hasta el cuadro 6 y obtienen una fácil victoria.

En el tablero de ajedrez de ocho casillas alineadas, las blancas pueden ganar con seis jugadas como máximo. De las cuatro posibles aperturas, T × T provoca inmediatamente el ahogo del rey negro, siendo así el mínimo juego posible. T − 5 causa la derrota de las blancas, pues basta que las negras jueguen T × T. Entonces las blancas han de responder C − 4, con lo que las negras consiguen mate en su segunda jugada tomando el caballo: T × C. Esta partida es una de los dos posibles "mates del pastor", capaces de lograr la victoria en número mínimo de jugadas. La apertura T − 4 permite a las negras dar mate en su segunda o tercera jugada, si responden con C − 5.

La única posible apertura capaz de dar la victoria a las blancas es C − 4. Las negras tienen entonces tres posibles respuestas:

1. T × C. En tal caso el blanco gana a la jugada siguiente, tomando la torre negra con la propia.
2. T − 5. Las blancas ganan jugando R − 2. Si las negras respondiesen ahora con T − 6, las blancas darían mate con T × C. Si las negras toman el caballo, el blanco tomaría la torre, las negras juegan a C − 5 y el blanco da mate al tiempo que toma el caballo negro.
3. T − 5. Esta es la jugada que más retrasa la derrota de las negras. Para lograr ganar, el blanco ha de responder C × T, forzando así al rey negro al cuadro 7. Las blancas llevan su torre a 4. Si las negras responden R × C, el rey blanco va a 2, las negras han de jugar forzosamente R − 7, y las blancas vencen jugando T × C.

También el primer jugador lleva las de ganar en "pinch" de ocho casillas (go lineal) si abre por la segunda casilla desde un extremo. Esta apertura también da la victoria en los juegos de siete y seis casillas. Supongamos que el primer jugador abre en la casilla 2. Si su contrario respondiera jugando en las casillas 3, 4, 5, 6, 7 u 8, para conseguir vencer las blancas han de contraatacar jugando, respectivamente, 5, 7, 7, 7, 5 y 6. Se ignora si existen otras aperturas que den con certeza la victoria. James Henle, inventor del "pinch", me asegura que en tableros de nueve casillas vence siempre el segundo jugador. Por lo que me consta, en tableros mayores el juego no está analizado hasta la fecha.

Taller y laboratorio

Deslumbrantes exhibiciones con láser, en las que se vierte luz sobre luz

Jearl Walker

Puede decirse que el "laser art" nació casi a la vez que el propio láser. El láser es un ingenio que emite luz coherente, razón por la cual puede emplearse para hacer demostraciones de efectos interferenciales verdaderamente deslumbrantes, que constituyen unos espectáculos visuales imposibles de conseguir con lámparas ordinarias. Este mes voy a describirles algunos de los artificios que empleo en mis demostraciones con transparencias en la Universidad estatal de Cleveland.

En cada una de las demostraciones, 10 proyectores arrojan simultáneamente la imagen de cinco transparencias sobre pantallas que ocupan paredes enteras. Todas estas imágenes se sincronizan con música. Durante determinadas partes de cada demostración, los proyectores quedan en blanco y no proyectan imágenes; en lugar de ello, se ponen en acción dos láseres de hélio-neón de 15 miliwatt que se dirigen a través de un dispositivo óptico para crear en las pantallas imágenes de figuras de interferencia y curvas de Lissajous. Inmediatamente antes de que los láseres entren en juego, se producen cuatro explosiones delante de las pantallas. Entonces, cuando los haces de los láseres atraviesan el humo, las trayectorias descritas por la luz por encima del público destellan brillantemente, dando casi la impresión de que los estrechos haces de un rojo brillante no son reales.

Los procedimientos que voy a exponer son de dos clases, uno de ellos basado en la interferencia de las ondas luminosas y el otro en la modificación de la trayectoria del haz de un láser mediante una oscilación mecánica. Los procedimientos basados en la interferencia han sido elaborados por David Yoel, estudiante de Cleveland, con quien estoy en deuda por sus esfuerzos. La dispersión que dan las rejillas de que dispongo es de calidad media.

Las rejillas se fabrican de plástico transparente sobre el que se prepara el reticulado por métodos no revelados. Una de las rejillas produce una figura de difracción del tipo que suele verse en las clases de física elemental: cuando la rejilla se introduce en el haz de un láser, en la pantalla se proyecta una hilera de puntos brillantes. Una segunda rejilla crea un racimo de puntos brillantes rodeados de otros más apagados. Una tercera crea un racimo parecido, pero con la diferencia de que los puntos brillantes están dispuestos rectangularmente.

Un cuarto tipo de filtro está construido a base de trozos del primer tipo de rejilla cortados en forma de gajos o trozos de tarta y dispuestos con las puntas agrupadas en el centro. Cuando este filtro se coloca dentro de un haz de láser ensanchado, los trozos producen una hilera de puntos cada uno y, como hay 48 trozos, aparecen 48 hileras de puntos brillantes que se extienden radialmente hacia el exterior partiendo del centro de la imagen.

El despliegue, impresionante, queda eclipsado por la figura que arroja el quinto filtro. Este crea la ilusión de una bolita de árbol navideño de un rojo brillante. En el centro de la figura aparece un punto luminoso, que despide un gran resplandor, alrededor del cual hay un círculo de puntos brillantes. A ambos lados de este círculo aparecen puntos rojos dispuestos de tal manera que producen la ilusión de la superficie de una bolita.

Todas las rejillas actúan aprovechando la interferencia ondulatoria de la luz, en especial, la difracción. El caso más simple de difracción lo ofrece la luz cuando atraviesa una pequeña rendija practicada en un filtro opaco. Esta rendija ha de ser muy larga y estrecha, de una anchura, digamos, de unos pocos micrometros. En realidad, lo que se persigue es que la anchura sea próxima a la longitud de onda de la luz que ha de atravesar la rendija. Con una apertura de esta clase, la luz se difracta, o sea, se esparce o propaga a lo largo de una recta paralela a la anchura de la rendija y, por ello, la luz que atraviesa la rendija no prosigue su propagación totalmente en su dirección inicial. En lugar de ello se extiende hacia los lados.

A la luz le ocurre algo más, y es que no se propaga uniformemente hacia los lados, sino que para determinados ángulos es más intensa, y para otros ángulos es menos intensa e incluso desaparece. Si esta luz se recoge en una pantalla, en ésta se puede observar una figura de rayas brillantes y oscuras (habitualmente llamadas franjas). La figura de difracción (tanto en lo que respecta a la propagación de la luz como a las rayas brillantes y oscuras) se debe a la interferencia de las ondas luminosas que atraviesan la abertura.

En la construcción matemática del fenómeno de las interferencias imaginamos que el frente de onda que en cualquier instante se encuentra en la rendija está compuesto de una serie de diminutos generadores de ondas, cada uno de los cuales emite una onda semicircular. Si hay un número muy grande de generadores, uno junto a otro, las ondas semicirculares se interferirán entre sí al expandirse, creando otro frente de ondas plano desplazado lateralmente respecto al inicial. Este nuevo frente de ondas tendrá también un número infinito de los generadores en cuestión, cada uno de los cuales emitirá su onda semicircular. Estas ondas semicirculares volverán a interferirse entre sí y a crear otro frente de ondas plano, desplazado respecto al precedente. Con este modelo es posible describir matemáticamente cómo se desplaza un frente de ondas.

Aunque tales generadores de ondas sean imaginarios (al menos no existen pruebas concluyentes de que la naturaleza actúe auténticamente de esa forma), la utilización de la composición de interferencias de diminutos generadores de ondas semicirculares como modelo de onda luminosa permite predecir los resultados de multitud de experimentos de óptica y, en particular, predecir la figura proyectada por una rendija estrecha iluminada con luz láser. Aquí, cuando una onda atraviesa la rendija, a cada lado de los generadores de ondas situados en la rendija ya no hay un número infinito de generadores. Este número era infinito antes de que el frente de ondas llegase a la rendija, pero la pantalla opaca elimina el resto de los generadores.

Con todo, los generadores que sí entraron en la rendija emitirán todos su

acostumbrada onda semicircular, pero con la diferencia, muy importante, de que el número de ondas semicirculares será ahora demasiado reducido para que su interferencia reconstruya el frente de ondas plano que llegó a la rendija. Parte de las ondas semicirculares se propagarán hacia los lados en vez de seguir derechas en la dirección perpendicular al filtro. Además, para ciertos ángulos respecto a la dirección de avance, la onda producida por alguno de los generadores estará exactamente en oposición de fase con la onda producida por los otros generadores; como resultado, no se emitirá onda luminosa resultante en dicha dirección. Entonces, cuando se interponga una pantalla en el camino de la luz difractada, esta anulación de una onda luminosa dará por resultado una raya negra en la pantalla. En otros lugares las ondas se reforzarán entre sí y producirán una raya brillante en la pantalla.

Una rejilla de difracción, que se compone de muchas rendijas, actúa fundamentalmente de la misma forma, con la salvedad de que la luz difractada a través de cada una de las rendijas interfiere con la luz procedente de todas las demás. En una rejilla de difracción puede haber decenas de miles de rendijas, cuyo efecto en la figura de difracción que se recoge en la pantalla es que las zonas brillantes son más estrechas y nítidas que en la figura que proyecta una rendija única.

Muchas de las rejillas de bajo precio que se encuentran en el mercado son

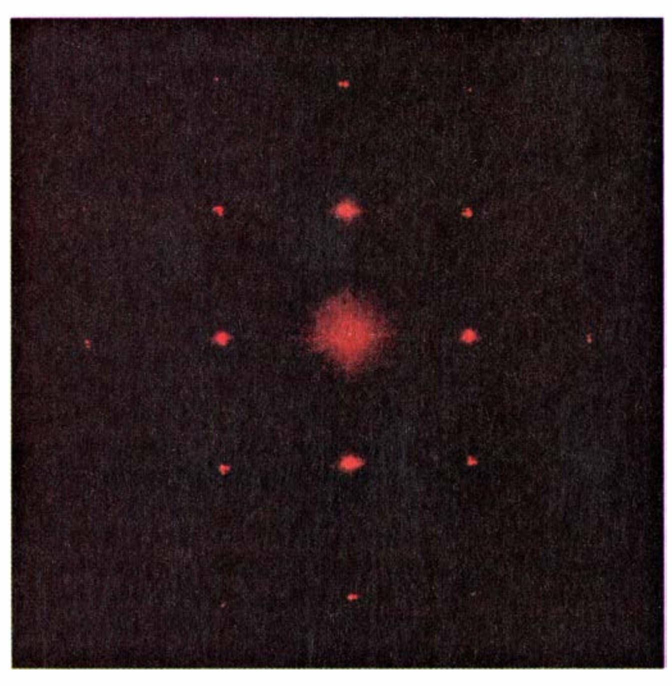
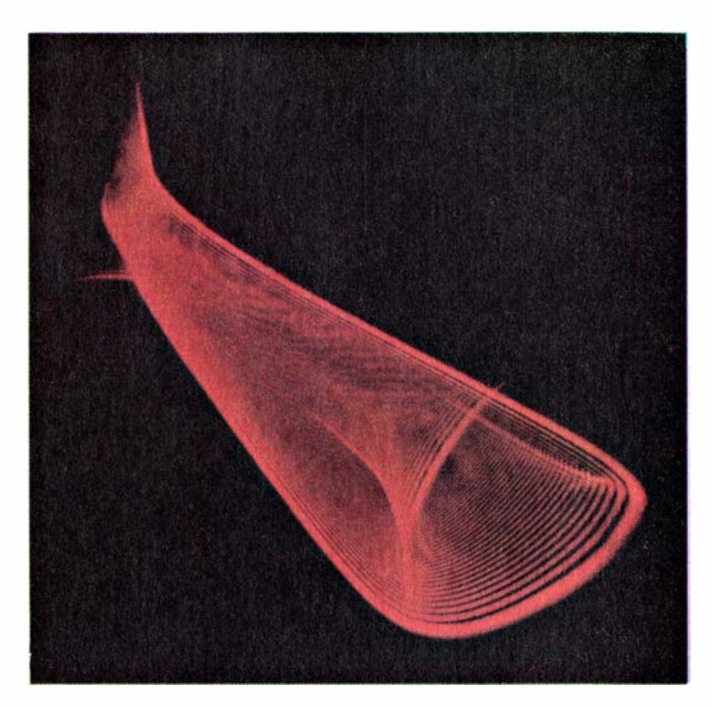


Figura de difracción producida por dos filtros de Ronchi cruzados



Plástico dibujado en el haz

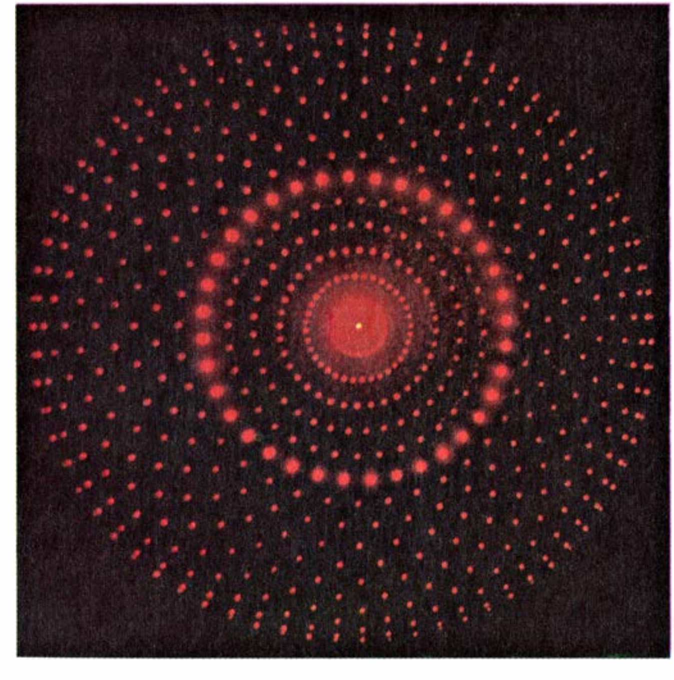
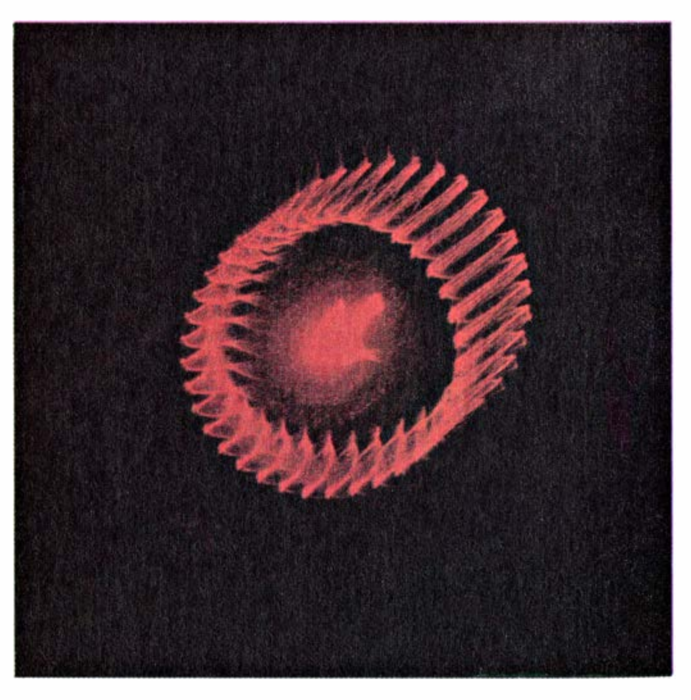


Imagen de la "bola de Navidad"



Rejilla de 48 segmentos combinada con plástico

copias en plástico de una red maestra grabada químicamente sobre vidrio o metal. Examinando una de las redes al microscopio puede detectarse la estructura del reticulado. Las "líneas" son de unos dos micrometros de ancho.

Toda red cuyo reticulado esté formado por rectas de transmisión y opacidad igualmente espaciadas se llama filtro de Ronchi. Estos filtros crean una figura de difracción compuesta de un punto central brillante y otros dos puntos brillantes, uno a cada lado del punto central. A cada lado y más lejos aparecen puntos menos brillantes, y la figura completa se encuentra sobre una recta. Los primeros puntos laterales son casi tan brillantes como el central, pero los demás lo son sensiblemente menos.

Si en un haz de láser se colocan dos filtros de Ronchi de manera que sus "líneas" formen un ángulo recto entre sí, cada filtro producirá su propia figura de difracción. El resultado es la combinación de las dos figuras, con un punto central brillante y ocho puntos algo menos brillantes dispuestos rectangularmente en torno al primero. Se aprecian puntos más pálidos ubicados a mayor distancia del centro.

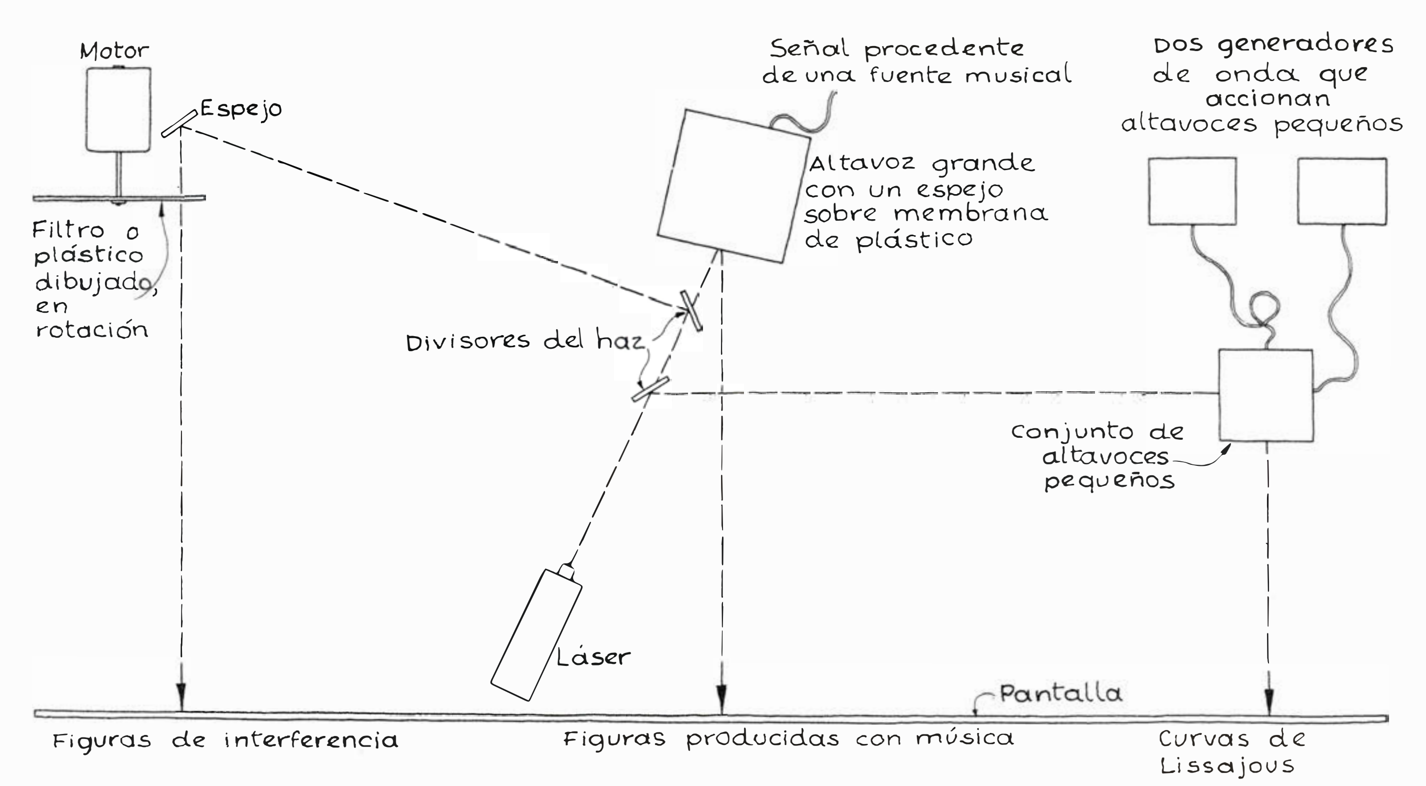
Cruzando más filtros de Ronchi, cada uno de ellos bajo un ángulo distinto respecto al precedente, se crean figuras de difracción progresivamente más complicadas. En todos los casos aparece un punto central brillante rodeado de un conjunto ordenado de puntos secundarios ligeramente más apagados. Además, toda la imagen se manifiesta ocupada por puntos sensiblemente menos brillantes correspondientes a órdenes de interferencia superiores.

En apariencia, el filtro de la bola navideña se compone esencialmente de dos o tres filtros de Ronchi cruzados, alguno de los cuales presenta una separación variable entre rayas. Este filtro no es simplemente el resultado de pegar entre sí tres o cuatro filtros de Ronchi corrientes. Se ha dado con un procedimiento para cruzar filtros de Ronchi sobre una sola superficie conformando adecuadamente las porciones realzadas de la misma. Al examinar este filtro al microscopio, observé un conjunto de protuberancias hexagonales dispuestas linealmente, de tal forma que el conjunto de hileras de protuberancias paralelas actuaba como un filtro de Ronchi. Una recta perpendicular a estas hileras puede designarse como eje n.º 1. Otro filtro (de eje n.º 2) se debe a la distancia de una protuberancia hexagonal a otra, medida a través del intervalo, y su eje está inclinado respecto al primero. Otro filtro (de eje n.º 3) está inclinado un ángulo igual y en sentido contrario. Un cuarto filtro de Ronchi puede ser el resultado de la periodicidad de la estructura a lo largo de cada hilera de protuberancias.

Los fabricantes están ensayando filtros que generan cuadrados y círculos concéntricos. También han comenzado a marcar sus productos mediante un nuevo procedimiento para reseñar los derechos de propiedad. En el interior de cada filtro han introducido un holograma que identifica a la empresa y a sus derechos de propiedad, de manera que, aunque el filtro se corte en trozos muy pequeños, la información correspondiente a ésta última continúa constando en cada trozo, ya que la imagen holográfica puede reconstruirse a partir de cualquiera de los trozos. Por otra parte, el holograma no interfiere con el destino fundamental del filtro, que es actuar como rejilla de difracción.

Colocando dos filtros en el haz del láser pueden crearse imágenes de belleza aún mayor. Por ejemplo, al dirigir el haz simultáneamente a través de un filtro de bola navideña y de un filtro de Ronchi corriente (el orden de los filtros no importa) resulta una figura de interferencia compuesta por otras tres, correspondientes a cada uno de los tres puntos brillantes proyectados por el filtro de Ronchi normal. Al sustituir el filtro de Ronchi sencillo por filtros de Ronchi cruzados ortogonalmente, la imagen se complica más, pero resulta ya menos atractiva a causa de la confusión de puntos; en esta confusión se pierde la ilusión de ver una superficie curva tridimensional. Otra figura muy interesante aparece cuando se ensancha el haz con una lente y luego se le envía a la vez a través de la rejilla en forma de trozos de tarta y de la red del adorno navideño. Haciendo girar la primera, se genera la ilusión de que sobre la pantalla se mueven enjambres de luciérnagas rojas.

Para conseguir que varíe la imagen



Disposición de los elementos ópticos en un espectáculo de luz láser

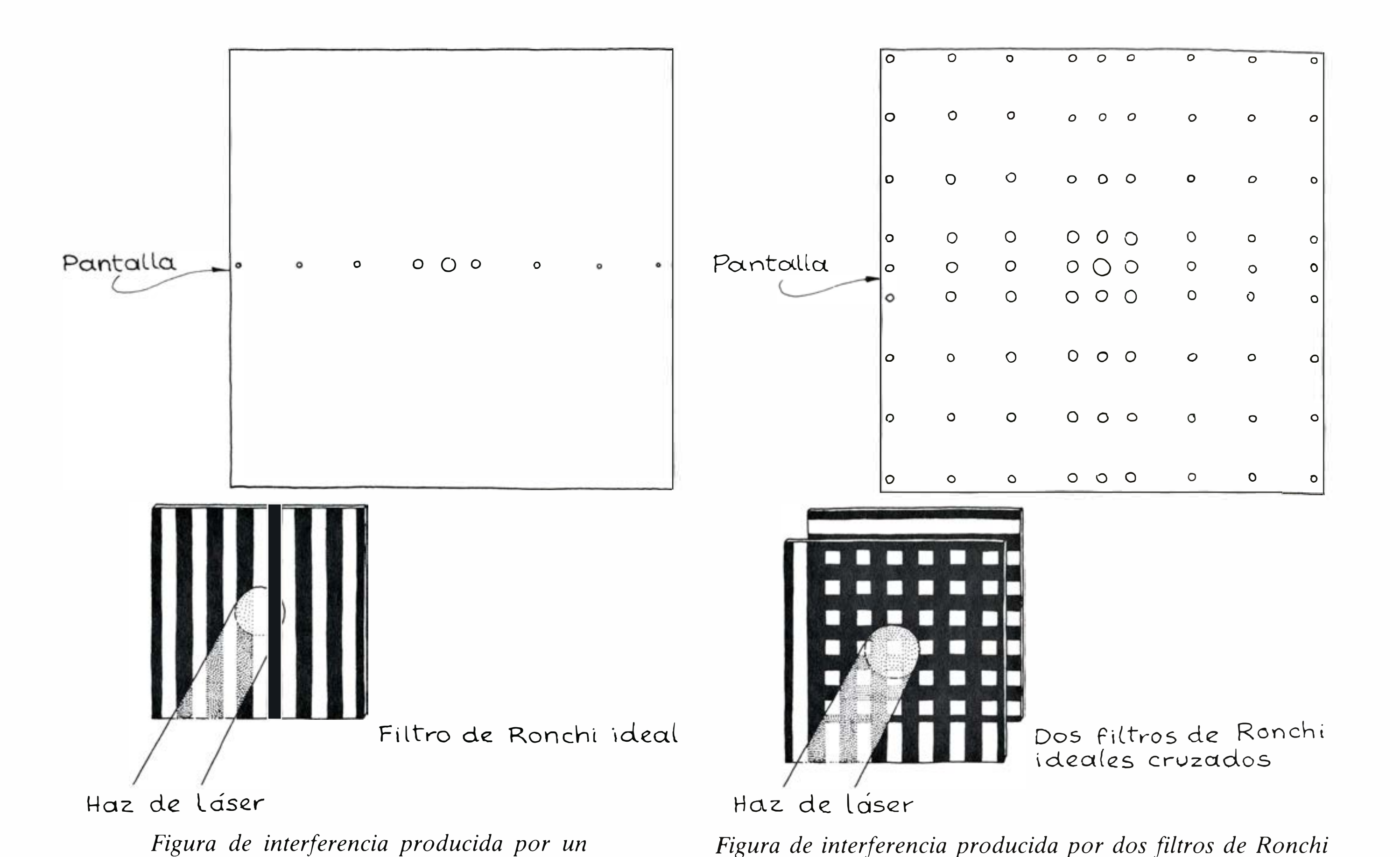


Figura de interferencia producida por un filtro de Ronchi

Figura de interferencia producida por dos filtros de Ronchi cruzados en ángulo recto

proyectada en la pantalla pueden hacerse mover los filtros dentro del haz. Este movimiento puede realizarse automáticamente montando los filtros sobre un eje accionado por un motor de baja velocidad. La belleza de la imagen puede aumentarse aún más si la velocidad del motor (y su sentido de giro) se regula ajustando la tensión de un autotransformador de relación regulable (variac). Con unos mandos de este tipo es posible hacer que el ritmo al que cambia la imagen coincida con el compás de la música.

Fotografiando dibujos geométricos de grandes proporciones pueden construirse filtros de Ronchi sencillos o complicados. Por ejemplo, sobre una hoja de papel blanco de grandes dimensiones puede trazarse un conjunto de rayas negras. Si ponemos la hoja de papel sobre el suelo, se ilumina con dos focos que intersecten con ella desde lados opuestos bajo ángulos de 45 grados. Después, se fotografía con una cámara de 35 milímetros enfocada hacia abajo y accionada por cable. Si se emplea película para transparencias, la filmina resultante puede servir de filtro.

En el libro de T. Kallard *Laser Art & Optical Transforms* se describen muchos tipos de filtros para juegos de óptica. El autor señala que si se dibuja el reticulado geométrico con tinta resultan unas rayas de "bordes confusos" a causa del lento corrimiento de la tinta, y una alteración gradual de la transmisión de la luz cerca de los bordes provoca la pérdida de los órdenes superiores en la figura de difracción. Si se desea que en la imagen aparezcan los puntos correspondientes a los órdenes superiores, los bordes deben presentar transiciones bruscas a la transmisión; por ello, Kallard recomienda emplear cinta adhesiva negra del tipo que se vende en las tiendas de artículos para trabajos artísticos. Esta cinta se colocará para formar el reticulado que se desee.

Intercalando vidrio o plástico con dibujos grabados pueden obtenerse figuras de difracción de un tipo diferente. Yo mismo he ensayado plásticos de distintos tipos de los que se emplean para cubrir los huecos de los techos de oficina en los que se alojan las lámparas fluorescentes. Todas estas tapas de plástico llevan dibujos, pero no todos los dibujos se comportan de la manera idónea dentro del haz de láser. La tapa más efectiva es la que tiene una superficie que parece como si la hubieran tallado con una espátula. Hay otras superficies con protuberancias hexagonales o semiesféricas. Estas superficies tienen menos interés si simplemente se intercalan en el haz, pero proporcionan imágenes sumamente interesantes cuando se las hace deslizar de un lado a otro del haz de forma que la figura de interferencia varíe continuamente. La combinación de trozos de plástico con uno de los filtros de difracción puede originar figuras de interferencia sorprendentes. Cuando cualquiera de ambos objetos se monta en un eje rotatorio, la imagen puede variar como la de un caleidoscopio.

La figura de interferencia generada al agitar un trozo de plástico se debe a la refracción que sufre la luz al atravesar el plástico. En efecto, los distintos rayos luminosos contenidos en el haz del láser atraviesan distintas superficies, cada una de las cuales está inclinada de manera diferente. Por tanto, los rayos recorren distintas longitudes dentro del plástico y emergen por superficies de distintas inclinaciones. Resultado de ello es que, aunque los rayos fueran inicialmente paralelos entre sí (o casi, según la divergencia del láser), ya no lo son después de atravesar el plástico. Entonces, los rayos que se solapan se interfieren entre ellos en la pantalla creando rayas brillantes y oscuras.

Pueden conseguirse los mismos efectos aplicando cola de aviación o pegamento a una placa de vidrio o de

alumno mío, construyó un sistema como éste con dos altavoces pequeños (del tipo habitualmente empleado en las radios de automóvil), accionados por dos osciladores de audio. Lo que se pretende es que uno de los altavoces desvíe el haz del láser horizontalmente y, verticalmente, el otro. Esta combinación de desviaciones es capaz de crear en la pantalla los complicados dibujos llamados curvas de Lissajous.

La reflexión del haz del láser se consiguió mediante un pequeño espejo que Laning montó en el interior de cada altavoz. El centro del cono de un altavoz es una zona levemente curva que oscila cada vez que el altavoz recibe una señal de audio. En dicha zona Laning pegó un trocito de estireno esponjoso, previamente conformado para adaptarse a la pequeña curvatura del lugar. La superfice exterior del estireno debía ser plana para que a ella pudiera pegarse uno de los extremos de un pequeño espejo de muy poco peso. El otro extremo de este espejo lo pegó a un lugar del cono situado entre la zona central y el borde exterior. Para este menester hubo que emplear una cola más bien elástica, que no se agrietase ni rompiese durante las oscilaciones.

El espejo y su montura tenían que ser muy ligeros, pues el peso adicional añadido podría haber amortiguado o eliminado las oscilaciones normales del cono. Cuando el altavoz se alimentó con una señal de audio normal, las vibraciones del cono obligaban al espejo a oscilar (más o menos) en torno al punto en que se encontraba pegado al estireno. Para aumentar la amplitud de las vibraciones, Laning practicó ranuras simétricas en el cono dispuestas radialmente desde la zona central hacia el borde exterior. Estas ranuras permitieron que el juego de las vibraciones del altavoz fuese mayor, de modo que cuando el sistema se emplease en la demostración con láser, las desviaciones del haz del láser sobre la pantalla fuesen mayores.

Una vez montados los espejos en ambos altavoces, Laning los fijó a un marco de madera de suerte que el plano de la abertura de cada altavoz formase un ángulo de unos 45 grados con la horizontal. Cuando los altavoces eran excitados por una señal de audio, el espejo de abajo oscilaba horizontalmente (o sea, en torno a un eje vertical) y el espejo de arriba verticalmente (en torno a un eje horizontal). Al espejo de abajo se dirigía el haz del láser, que se reflejaba hacia el espejo de arriba, y desde éste hacia la pantalla. Para alinear el haz, los espejos y la

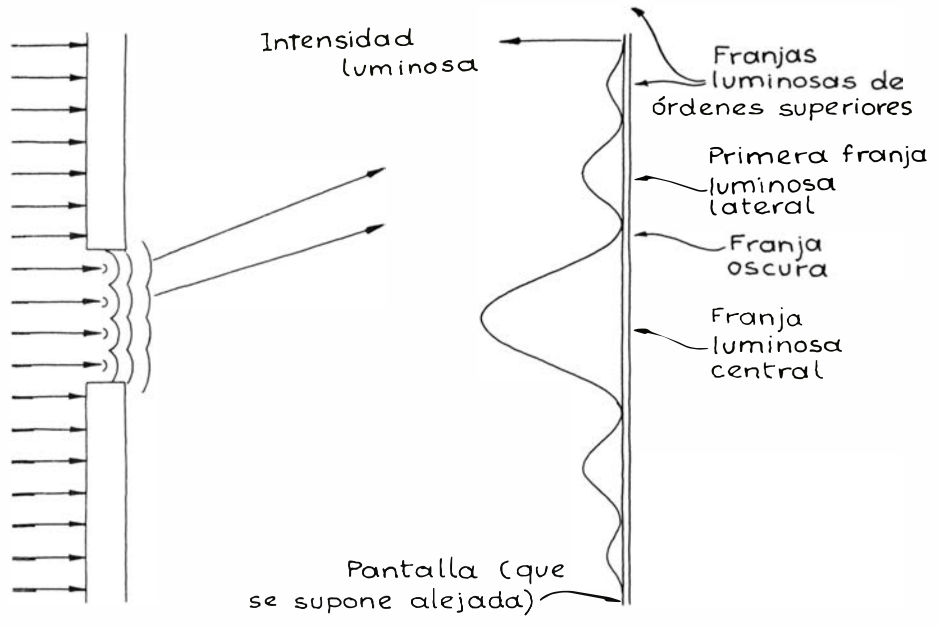
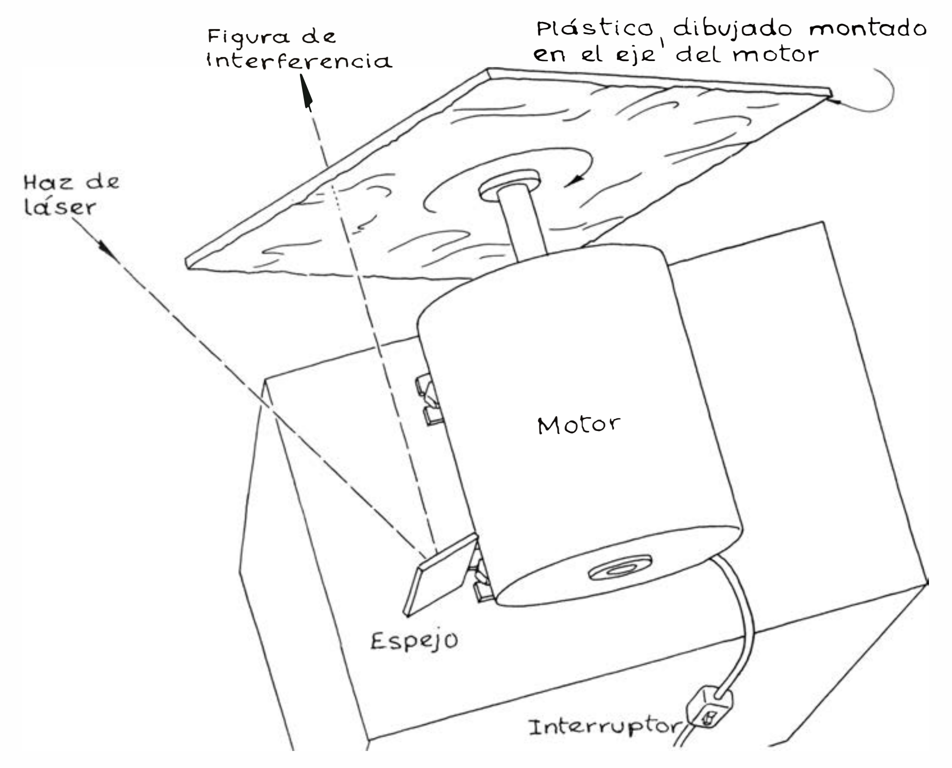


Figura de difracción proyectada por una rendija estrecha

plástico transparente. Mientras se seca, hay que remover la cola, asegurándose no sólo de que la superficie quede suficientemente rugosa, sino además de que la cola se seque con algunas burbujas pequeñas. La superficie rugosa da lugar a una complicada figura de interferencia sobre la pantalla. Las burbujas generan figuras de interferencia más sencillas, pero más agradables, consistentes en franjas oscuras y brillantes, apretadamente espaciadas y dispuestas geométricamente. Durante alguna de mis demostraciones con láser, lo que hago es desplazar una burbuja dentro y fuera del haz al objeto de dotar de movimiento a la figura de interferencia que aparece en la pantalla. Para alcanzar cualquiera de estos efectos interferenciales ha de empezarse por ajustar la distancia entre los componentes ópticos y la pantalla hasta que en ésta aparecen imágenes del tamaño conveniente.

Con el láser puede crearse un conjunto de imágenes completamente diferentes utilizando altavoces a los que se alimenta con una señal de audiofrecuencia y en los que se refleja el haz del láser. Ray Laning, antiguo



Dispositivo para hacer girar plástico dibujado dentro del haz del láser

*Disposición de los altavoces para crear curvas de Lissajous (***izquierda***); montaje de los altavoces pequeños (***derecha***)*

Algunas de las curvas de Lissajous que pueden conseguirse con el sistema de altavoces pequeños

imagen final en la pantalla nos tuvimos que armar de una buena dosis de paciencia.

Después de alinear el sistema, la imagen recogida en la pantalla era un punto luminoso aislado. Laning conectó luego un oscilador de audio a cada altavoz. Cada oscilador produjo una señal eléctrica sinusoidal que provocó la vibración del altavoz correspondiente, determinando así que los espejos se movieran dentro del haz del láser. Al hacer oscilar el espejo de abajo, éste produjo la desviación horizontal del haz que, por tanto, se movió de una a otra parte a través del espejo superior y horizontalmente a través de la pantalla. A su vez, las oscilaciones del espejo de arriba produjeron la oscilación vertical del haz. De esta forma, el haz se desviaba horizontal y verticalmente a la vez y se desplazaba en consonancia a través de la pantalla.

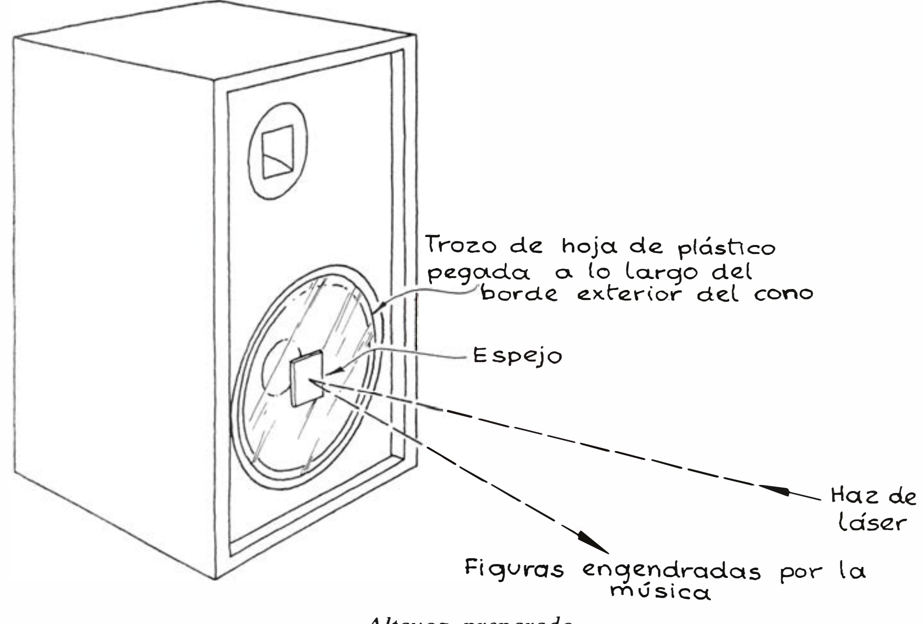
En el sistema se introdujeron dos espejos y dos osciladores de audio, al objeto de controlar por separado la frecuencia y la amplitud de cada desviación. Por ejemplo, supongamos que los espejos se hubieran hecho oscilar a la misma frecuencia. Entonces, en la pantalla podrían haber aparecido varias figuras según cuál fuese la relación de fase de las oscilaciones. Consideremos unos ejes de coordenadas *x-y* superpuestos a la pantalla, tales que el centro de coordenadas coincida con la posición del haz sin desviar. Si el espejo inferior comienza a desviar el haz hacia la derecha a la vez que el espejo superior comienza a desviarlo hacia arriba, el haz se moverá a través de la pantalla desplazándose hacia la parte superior derecha de ésta. Si las amplitudes de ambas oscilaciones son iguales, el haz trazará una línea recta en la pantalla que formará un ángulo de 45 grados con la horizontal. Tras completar una oscilación, el haz volverá a trazar la recta de vuelta al origen y proseguirá hacia la parte inferior izquierda de la pantalla. Mientras continúen las oscilaciones, el haz trazará repetidamente la misma recta inclinada. Una línea recta no es una figura especialmente interesante, pero es el caso de curva de Lissajous que aparece cuando las oscilaciones tienen la misma frecuencia y la misma amplitud y están en fase (lo que significa que ambas señales aumentan y disminuyen a la vez).

Supongamos que, en vez de ser así, la elongación horizontal del haz está en un máximo a la derecha cuando la elongación vertical comienza a enviar el haz hacia arriba. Se dice aquí que las oscilaciones están desfasadas 90 grados. Al tiempo que el haz empieza a retroceder horizontalmente, también comienza a ser enviado hacia arriba; de esta forma, cuando se alcanza la máxima elongación vertical, la elongación horizontal se anula. Correspondientemente, lo que se ve en la pantalla es una porción de otra curva de Lissajous: el punto luminoso describe un trozo de círculo, moviéndose desde el extremo de la derecha hasta el punto más alto del círculo. Al seguir las oscilaciones, el círculo acabará cerrándose y la traza volverá a repetirlo. Si las oscilaciones de los espejos son de baja frecuencia, podrá realmente verse cómo el punto luminoso describe el círculo. A las frecuencias que nosotros empleamos en nuestros espectáculos de luz, el círculo se generaba a tal rapidez que la persistencia de nuestra visión nos produjo la ilusión de que en la pantalla había siempre un círculo completo.

Ajustando los mandos de amplitud de los osciladores, Laning consiguió controlar la amplitud de oscilación de cada espejo. Entonces, cuando hizo que la amplitud de la oscilación horizontal fuese mayor que la de la oscilación vertical, la figura que apareció en la pantalla era una elipse con el eje mayor horizontal. Análogamente, consiguió crear una elipse con el eje mayor vertical.

Ajustando los mandos de frecuencia de los osciladores Laning pudo controlar también las frecuencias de las oscilaciones. Supongamos que se da la misma amplitud a la oscilación de cada espejo, pero que uno de ellos se hace oscilar dos veces más rápido que el otro. Supongamos, además, que la frecuencia mayor corresponde a la oscilación horizontal y que las dos oscilaciones están en fase. Consideremos que inicialmente el haz se encuentra en el origen de coordenadas. Entonces, comenzará a moverse hacia la derecha y hacia arriba, pero debido a la diferencia de frecuencia habrá alcanzado sólo la mitad de la elongación vertical máxima en el instante en que alcance la elongación horizontal máxima. Seguirá moviéndose hacia arriba, aunque ahora comenzará a retroceder hacia la izquierda. En el instante en que la elongación horizontal vuelva a ser nula, la elongación vertical será máxima. La trayectoria así descrita es parte de un número ocho correctamente dispuesto respecto a la vertical. El resto del número ocho se describe en el transcurso de las oscilaciones. Si los espejos oscilan con rapidez suficiente, la persistencia de la visión ofrecerá la ilusión de que en la pantalla hay un número ocho rojo, brillante, Análogamente, puede crearse un número ocho horizontal dotando a la elongación vertical del haz de una frecuencia doble que a la elongación horizontal.

Laning no disponía de procedimiento para controlar las fases relativas. Lo que en realidad ocurría es que las fases variaban de forma desconocida cada vez que se ponían a cero las frecuencias de los osciladores. Por consiguiente, lo que se hizo durante la demostración fue variar las frecuencias y las amplitudes hasta que en la pantalla apareciese una figura agradable. No sólo se consiguió crear rectas, círculos y ochos, sino también curvas de Lissajous más com-



Altavoz preparado

plicadas. Con algunos ajustes, Laning logró crear una figura que variaba lentamente de línea recta a elipse y viceversa. Esta figura cambiante daba la impresión de ser un círculo tridimensional que girase lentamente en la pantalla. A veces, se veía todo el círculo como si estuviese ligeramente inclinado hacia el exterior del plano de la pantalla; otras veces, el círculo aparecía de canto, cual si fuera perpendicular a la pantalla.

Durante una de sus demostraciones, Laning jugó con los mandos al objeto de pasar de una ilusión a otra. A veces, al dar con un círculo, cambiaba rápidamente la amplitud de ambos osciladores y entonces se veía una figura que rápida y suavemente pasaba de círculo grande a círculo pequeño, para luego invertir el fenómeno. Mi impresión era la de estar escudriñando por el extremo abierto de un tubo muy grande. Para oscilaciones más lentas, en las que la persistencia de la visión ya no predomina, la traza de luz láser parecía describir una espiral que constantemente iba y venía de la pantalla. Laning pudo acompasar la ilusión al ritmo de la música.

Utilizando un altavoz accionado por una señal de audio procedente de la misma fuente musical del espectáculo puede conseguirse una respuesta directa de la imagen a la música. Yoel tendió una línea de audio desde mi magnetofón, que proporcionaba la música, hasta una de sus viejas pantallas acústicas estereofónicas, que previamente había modificado. Sobre la abertura del cono de graves extendió una hoja de plástico como las usadas para envolver alimentos, pegándola al borde. (El trabajo resulta más fácil si el cono se coloca señalando hacia arriba.) El trabajo lo realizó con cola blanca corriente, que es suficientemente resistente y estira el plástico dejándolo más tenso después del secado. Durante éste puso unos cuantos libros de buen peso sobre el borde. Terminado el secado, pegó un espejo de poco peso directamente al centro de plástico.

Cuando las señales audio procedentes del reproductor de cassettes de Yoel excitaban el altavoz, las variaciones de la presión del aire encerrado entre el cono y el plástico provocaban la oscilación del plástico y el espejo. Entonces Yoel producía la reflexión de un haz de láser desde el espejo hasta la pantalla. Las figuras, constantemente cambiantes, eran por tanto una respuesta a la música que entraba en el altavoz, y no puramente curvas de Lissajous, aunque la imagen resultaba muy agradable ya que estaba acompasada a la música que oía el público. La respuesta era mayor para las frecuencias musicales bajas, lo cual obedecía a que la masa de aire que había que desplazar en el interior del cono era relativamente mayor.

Estos sistemas con altavoces requieren ambos espejos de poco peso, que pueden adquirirse en tiendas de material científico. La mayoría de los espejos, sin embargo, no reflejan demasiado bien. Si el láser disponible es de gran potencia, esto puede no importar demasiado, ya que la pérdida de algo de luz por absorción en el espejo dejará siempre luz suficiente para que el público pueda apreciarla en la pantalla. Otro problema es que muchos espejos corrientes no dan una reflexión clara y por ello añaden divergencia al haz del láser. Nosotros empleamos un espejo de gran calidad y luego, con un diamante de cristalero, lo cortamos a trozos suficientemente pequeños para montar en los altavoces.

En el sistema proyectado por Laning pueden sustituirse altavoces y espejos por marcos de galvanómetros, lo que puede hacerse aprovechando el de uno de estos instrumentos ya fuera de uso. Estos marcos ofrecen una respuesta más rápida y clara que los altavoces y, por tanto, proporcionan figuras más nítidas en la pantalla. Así, en las demostraciones comerciales en las que se dibuja y se escribe sobre una pantalla con el haz del láser se usan galvanómetros. Pero cualquiera que sea el montaje empleado, debe ponerse cuidado en no alimentar al sistema con una señal excesiva. En varias ocasiones, al instalar nuestros dispositivos hemos hecho estallar los espejos.

Sólo les he mencionado algunos de los procedimientos de láser artístico que pueden utilizarse en los espectáculos de luz. En otro artículo les describiré cómo conseguir que el haz del láser se haga visible al pasar por encima del público.

También les describiré otros muchos procedimientos mediante los cuales proyectar en la pantalla figuras de interferencia. Como observación final, permítaseme recordarles que la luz láser es peligrosa. Al dirigir un haz hacia una pantalla, hay que tomar precauciones para que nadie del público pueda interceptarlo al ponerse de pie. Además, hay que cuidar de que la luz dispersada por la pantalla no adquiera un brillo peligroso. En varios existen normas oficiales estrictas aplicables al uso del láser en exhibiciones públicas.

Libros

Infecciones y antibióticos, selección de escritos de Kapitza y una compilación sobre los Vertebrados

Jesús Guinea, Luis Alonso y Jacinto Nadal

MANUAL DE ANTIBIOTERAPIA, por J. Duval y C. J. Soussy. Ed. Toray-Masson. S. A. Barcelona 1980; 186 páginas. Como señala el título original de la obra, se trata de un compendio de antibioterapia que intenta plantear y resolver los principales problemas relacionados con el uso de antibióticos, sin olvidar, como se indica en el segundo título de la versión castellana, los fundamentos bacteriológicos para la buena utilización de los mismos. El nivel es desigual y sólo se consigue alcanzar una información irreprochable en algunos capítulos. El libro está estructurado en tres partes: la primera, más extensa, consta de ocho capítulos y estudia los antibióticos adecuados para el tratamiento de infecciones bacterianas no tuberculosas; la segunda parte, con dos capítulos, comprende los antibióticos antituberculosos. Los antifúngicos constituyen el único objetivo de la tercera parte, que consta de un solo capítulo.

Tras una breve y confusa introducción, el lector encuentra en el primer capítulo la clasificación de los principales antimicrobianos. La información se complementa con la suministrada en el capítulo octavo, en el que se estudian de un modo más completo las propiedades de los antibióticos. Evidentemente, su contenido no justifica la elaboración de la obra, porque la estructura y el modo de acción de los antibióticos están perfectamente descritos en otras obras, algunas de menor extensión y otras más completas y de gran nivel, como la firmada por J. Asselineau y J. P. Zalta, escrita y editada en el país de los autores. En el capítulo segundo se plantea el problema de la resistencia de las bacterias a los antibióticos. Hay menciones especiales para el estafilococo y los bacilos gramnegativos, con datos obtenidos a partir de medios hospitalarios. La explicación de las bases genéticas de la resistencia bacteriana a los antibióticos contiene graves omisiones que se neutralizan parcialmente al término del capítulo, al mencionarse brevemente los fenómenos de transducción y transformación. En el capítulo tercero se habla de las pruebas de laboratorio útiles para la elección del tratamiento. Aparecen convenientemente señalados los ensayos de CIM, los conceptos de bacteriostático y bactericida, el antibiograma y los problemas de las asociaciones de antibióticos. El capítulo finaliza con una nota técnica relativamente útil para los no familiarizados con la bacteriología práctica. Probablemente, la aportación positiva del libro reside en los capítulos que tratan de la acción "in vivo" de los antibióticos, los riesgos tóxicos de los mismos y la elección y prescripción de un tratamiento antibiótico. En ellos puede leerse de un modo breve, pero crítico, el planteamiento del problema, los criterios farmacológicos y la conducta terapéutica aconsejable. En la misma línea de información aparece la segunda parte del libro, en la que se estudia y aconseja la antibioterapia antituberculosa. La antibioterapia antifúngica se describe en las siete páginas de que consta la tercera parte del libro. Su información es escasa y la mayor, que corresponde a la anfotericina B, es un traslado de las normas de posología, toxicidad y farmacocinética de un producto comercializado.

La nomenclatura bacteriana es absolutamente herética. Se ignora y atropella al Código Internacional de Nomenclatura (Bacteriological Code, 1976). Se atribuyen caprichosamente géneros variables a las bacterias. Se habla de "las acinetobacter" (pág. 19) y de "los acinetobacter" (pág. 27), "los citrobacter" (pág. 26), etcétera. En la página 28, el lector al encontrarse con la expresión "... hemófilos" debe comprender que se escribe acerca del género *Haemophilus*. Se citan géneros bacterianos desconocidos en el Manual Bergey, como "bacterioides" (pág. 131) y un bacilo grampositivo perteneciente al género *Rouget* (pág. 109). Independientemente, hay términos que deberían sustituirse por la auténtica palabra española, por ejemplo, gelosa, cuya versión castellana no es otra que la de agar. El libro concluye con un apéndice incorporado por el traductor en el que se incluyen algunos comentarios sobre la josamicina. (J. G.)

EXPERIMENT, THEORY, PRACTICE, por Piotr Leovidovich Kapitza. D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Holland, 1980. Decía el comunicado oficial de la concesión del Nobel de física correspondiente al año 1978: "al profesor P. L. Kapitza, del Instituto de Problemas de Física, de la Academia Soviética de Ciencias en Moscú, por sus hallazgos en el campo de la física de bajas temperaturas". Compartieron el máximo galardón con él los profesores Arno A. Penzias y Robert W. Wilson, éstos por haber descubierto, en 1965, la radiación cósmica de fondo 3 K.

¿Por qué tardó tanto la Academia Sueca en reconocer los méritos que ya muchos habían olvidado? Los trabajos a que hace alusión el comunicado los había llevado a término hacía treinta años largos. Quizás obscuras razones políticas tengan la respuesta. Kapitza, hijo de ingeniero militar, había nacido el 9 de julio de 1894 en Kronstad e hizo sus estudios en la Facultad de Electromecánica del Instituto Politécnico de San Petersburgo. Se graduó en 1918, donde impartió clases al propio tiempo que iniciaba su labor de investigación de la mano de A. F. Ioffe, quien había reunido, en su entorno, un entusiasta grupo decidido a crear una escuela rusa de física. Sobresalía ya entonces por su ingenio perspicaz para solucionar problemas prácticos. (Escribirá más de una vez: "He llegado a entender que la mejor manera de evaluar correctamente la capacidad del principiante y del científico curtido es a través de su inclinación y capacidad de dar con el camino más sencillo para solucionar los problemas", pág. 257.) Va a Cambridge en 1921. La ilusión de los jóvenes físicos de entonces se repartía entre trabajar con Bohr en Copenhague o con Rutherford en el Cavendish, Cambridge.

Pero no parecía que Ernest Rutherford estuviera muy predispuesto a contar con él. Se cuenta que, ante la reticencia y frialdad con que le recibió, Kapitza le preguntó cuál era un error razonable en sus trabajos de experimentación. Contestó Rutherford que podría considerarse el 2 o el 3 por ciento. A lo que, rápido, el ruso le argumentó: "puesto que en su laboratorio hay unos 30 investigadores, uno

más cabría aún dentro de ese margen de error". Rutherford quedó convencido y le aceptó. La historia de la física contemporánea está salpicada de anécdotas como esta que la hacen más humana y menos distante de lo que el profano supone.

Todos los veranos se desplazaba Kapitza desde Inglaterra hasta Rusia para ver a su madre. En 1934 fue detenido por orden de Stalin y ya no se le dejó volver a Cambridge. En sus trece años de estancia en el Cavendish fue, primero, director adjunto del departamento de magnetismo y, de 1930 a 1934, director del Royal Society Mond Laboratory. Se funda, para él, el Instituto Soviético de Problemas de Física, en 1937, y, hasta 1945, se le permite trabajar en los estudios que había emprendido en Cambridge. El desarrollo de la bomba atómica por los físicos de Los Alamos torció definitivamente el sesgo de sus aficiones: la carrera de armamentos y lo que, en la década siguiente, sería la del espacio habían empezado. Se le obligó a trabajar en "una comisión para el estudio de los usos estratégicos de la radiación cósmica". Al negarse, los dirigentes del partido entendieron que se "trataba de un sabotaje premeditado contra los intereses de la defensa nacional". Se le apartó del Instituto de Problemas de Física, se le encarceló y por último se le envió a un centro de investigación nuclear en los Urales. Vuelve al Instituto a raíz de la muerte de Stalin. Bajo su dirección, se crea y potencia el armamento nuclear soviético y el programa Sputnik.

Kapitza pertenece a la rara especie de científicos especialistas en muchas áreas: física nuclear, ingeniería eléctrica, estado sólido, helio líquido, hidrodinámica y licuefacción de los gases. Empezó por investigar con Rutherford las huellas de las partículas alfa y beta, pasó a la producción de campos magnéticos de alta intensidad, profundizó en el helio líquido. En este último campo logró sus mayores éxitos. El experimentalista y el teórico se plasmaron perfectamente en el diseño de un dispositivo licuefactor de helio. Para alcanzar bajas temperaturas inventó un nuevo tipo de licuefactor donde se obtenía el enfriamiento por expansión adiabática.

Por las fechas en que Kapitza reemprendía sus investigaciones en Moscú (1938), estaba en boga el asunto de las desconcertantes propiedades del helio II –la fase del helio líquido ^{4}He que existe a temperaturas por debajo de los 2,17 grados Kelvin, el llamado punto lambda–. (W. H. Keesom había descubierto en 1922, en Leiden, que el helio líquido poseía cierta "superfluidez", que él describió como "destilación".) Kapitza midió la viscosidad del He II y la cifró en 10^{-9} poise. Así juzgó su hallazgo: "Ese límite quizá baste para sugerir, por analogía con los superconductores, que el helio por debajo del punto lambda entra en un estado especial que podríamos denominar 'superfluido' ...". Experimentando con los efectos térmicos asociados al flujo, L. Tisza llegó a la idea de que el helio II venía a ser una mezcla íntima de un "superfluido" que se movía con toda libertad, aunque sin comportar entropía, y un "fluido normal", que sí portaba entropía y sufría una resistencia viscosa a su flujo. Este modelo de los dos fluidos se establecería de un modo más firme con las aportaciones independientes de L. D. Landau, quien lo enmarcó en el contexto de la teoría cuántica del helio superlíquido, trabajo que le valió el Nobel de física en 1962.

El lector encontrará en el libro otras innovaciones importantes de Kapitza sobre plasma, magnetismo, electrónica de microondas de alta potencia, oxígeno, etcétera. En un lenguaje claro, con el recurso constante a la visualización experimental. Kapitza trasluce una vastísima cultura humanística, que nos recuerda a Oppenheimer y Heisenberg, insiste en la necesaria asociación teoría-experimento, cree en la proyección social de la ciencia. Su talante es el del científico que ve antes el sentido físico del problema que la resolución matemática del mismo. Ama la libertad creadora al tiempo que se revela como un excelente organizador y administrativo de instituciones científicas. (L. A.)

VERTEBRADOS. ESTRUCTURA y FUNCIÓN. Selecciones del Scientific American. Traducido de la edición inglesa por F. García Alvarez, M. Hernández Jodra, M.ª Rosa Segarra y M. Valera Entrecanales. Editorial Blume, 1979. La anatomía comparada de los Vertebrados se ha visto influida últimamente por los avances de la fisiología comparada y tiende a trabajarse dentro de lo que podemos llamar anatomía funcional. En esta orientación se encuentra este libro que no intenta ser un tratado de anatomía funcional, sino que compendia una serie de trabajos que han pasado a ser clásicos y fueron publicados por *Scientific American* entre 1955 y 1974. Su mérito es precisamente éste, separarse de la rigidez del libro de texto para que, exponiendo trabajos de investigación, se amplíe la visión del lector y comprenda éste cómo avanza la ciencia.

Se inicia el libro con un ensayo de Norman K. Wessells sobre los Vertebrados, en el que se explica hipotéticamente su aparición, por qué su cuerpo fue estructurándose de esta manera, su paso a tierra firme, los cambios que han conducido, a lo largo de millones de años, a la diversidad de la vida vertebrada y al hombre moderno. A este ensayo siguen ocho capítulos, cada uno de ellos con su introducción y una bibliografía referida tanto a los capítulos como a los artículos que comprenden estos últimos.

La introducción al capítulo primero, "Adaptaciones estructurales de los Vertebrados", plantea la evolución y selección de los mecanismos de locomoción en la serie vertebrada y justifica la elección de los trabajos que integran dicho primer capítulo. Sir Jonnes Gray, ("Cómo nadan los peces"), trata de la natación de peces y cetáceos, exponiendo los problemas mecánicos que comporta. Milton Hildebrand, a propósito de cómo corren los animales, estudia fundamentalmente las características del desplazamiento de un ungulado y un carnívoro. Después de este trabajo es interesante, por contraste, la lectura del artículo dedicado a las serpientes, de Carl Gans; este grupo de animales, al perder sus extremidades, recurren a cuatro tipos de avance que les exigen gran flexibilidad, conseguida gracias al alargamiento del cuerpo. Sólo el hombre anda; de ello se ocupa John Napiez en la historia del caminar humano, en cuyo trabajo narra el origen del bipedismo y pormenoriza en qué medio debió darse. Este mismo investigador es el responsable del trabajo de la evolución de la mano, que se fundamenta en el estudio de la anatomía funcional. Carl Welty aborda el vuelo de las aves: mecanismo especialmente útil para proteger un determinado grado de homeostasis que posee un alto nivel de eficacia. Walter Modell se detiene en los distintos tipos de defensas frontales e intenta pronosticar la tendencia evolutiva respecto a este carácter (cuernas y cornamentas).

El capítulo segundo, "Biología de los sistemas vasculares", se inicia con una introducción que trata de la evolución del aparato circulatorio, tanto desde el punto de vista anatómico como fisiológico. A esta introducción siguen cinco trabajos. La fisiología del ejercicio es resuelta por Chapman y Mitchell; llegan a la conclusión de que la limitación fundamental de la capacidad del orga-

nismo para el ejercicio físico es el gasto cardíaco; estudia también los mecanismos encargados de adaptar este gasto cardíaco a las necesidades de los músculos durante el ejercicio. Carl J. Wiggers nos descubre la estructura y función del corazón. Benjamín W. Zweifach resuelve el capítulo la microcirculación de la sangre, describiendo los diferentes tipos de pared de los vasos y analizando los mecanismos más finos de la circulación sanguínea a nivel capilar. H. S. Mayerson examina el sistema linfático, su naturaleza anatómica y función, mecanismos de filtración y circulación linfática. Scholander firma el artículo sobre los sistemas contracorriente, con buenos ejemplos de su importancia biológica.

En la introducción al capítulo tercero, "El intercambio gaseoso: adaptaciones para el buceo y las grandes alturas", se expone la evolución del aparato respiratorio de los Vertebrados y adaptaciones a los distintos medios. Kjell Johanssen se ocupa de los peces pulmonados; Julius H. Comroe Jr., de los pulmones; Knut Schmidt-Nielsen, de la respiración de las aves; John A. Clements, de la tensión superficial en los pulmones; P. F. Scholander, del equilibro respiración-ritmo cardíaco; Suk Ki Hong y Hermann Rahn, de la fisiología del buceo y Raymond J. Hock, de la fisiología de las grandes alturas. En los peces pulmonados se plantea el problema de su origen, las habilidades que han ido desarrollando y el caso de la respiración aérea en peces no pulmonados. En los pulmones, se analiza el sistema respiratorio, la circulación pulmonar, la mecánica respiratoria, la medición de la función pulmonar, la regulación de la ventilación y el tracto respiratorio superior. En la respiración de las aves, se traza la historia del conocimiento de la misma, que empieza por la anatomía del aparato respiratorio hasta llegar, muy recientemente, a su funcionalismo. A propósito de la tensión superficial en los pulmones, acaba de demostrarse que los espacios aéreos del pulmón están recubiertos por una compleja sustancia que rebaja la tensión superficial y que impide que el órgano se colapse. En el equilibrio respiración-ritmo cardíaco se detallan los mecanismos de defensa de los Vertebrados contra la asfixia, cuyo modelo se basa en una distribución de la mayor parte de la circulación que concentra oxígeno en el cerebro y el corazón. En la fisiología del buceo, se interpretan los mecanismos fisiológicos que presentan las buceadoras japonesas en su inmersión diaria, durante largas horas, en edades comprendidas entre 11 y 65 años, y no interrumpida por el embarazo. La fisiología de las grandes alturas nos desentraña las adaptaciones del organismo a la falta de oxígeno; el autor compara las reacciones entre individuos adaptados a las grandes alturas y otros que no soportan condiciones de hipoxia.

El capítulo cuarto, "El equilibrio hídrico y su control", describe en su introducción el riñón y su fisiología en toda la escala de los Vertebrados. Esta introducción va seguida de dos apartados. En el primero, sobre el elan y el órice, C. R. Taylor nos ayuda a comprender los mecanismos de regulación hídrica a través de casos límite: animales capaces de regular la pérdida de agua en ambientes desérticos con temperaturas elevadas, sin agua. Knut Schmidt-Nielsen se adentra en el tema de las glándulas salinas (regulación osmótica en distintas especies de aves y reptiles marinos y su solución gracias a las denominadas glándulas de la sal).

La introducción al capítulo quinto, "Adaptaciones a la temperatura", sirve para abrir al lector el campo de la regulación de la temperatura en los Vertebrados y las soluciones que éstos han desarrollado en situaciones límite. Siguen seis capítulos: peces de cuerpo caliente (atunes y algunos tiburones), de Francis G. Carey. La regulación de la temperatura en los reptiles (lagartos), de Charles M. Bogert; adaptaciones al frío (Vertebrados homeotermos), de Laurence Irving; el termostato humano (papel del hipotálamo en la regulación del calentamiento del cuerpo y mecanismo que provoca la elevación de la producción de calor metabólico), de T. H. Benzinger; producción de calor a partir de las grasas (existencia de dos tipos de grasa, la normal, o blanca, y la parda, que presentan muchos mamíferos recién nacidos y adultos, cuyo metabolismo incrementa la liberación de calor como respuesta al frío), de Michael J. R. Dawkins y David Hull; las ardillas del desierto (resistencia a la aridez y calor del desierto), de George A. Bartholomew y Jack W. Hudson. A lo largo de todo este capítulo se pone de manifiesto hasta qué punto la fisiología y el comportamiento inciden en la regulación de la temperatura corporal.

El capítulo sexto, "Orientación y navegación", consta de una introducción y cinco trabajos. Se desvelan los sistemas que presentan los Vertebrados para recibir información respecto al medio y el aprovechamiento de ésta por los mecanismos de orientación y migración. En la orientación del salmón, investigada por Arthur D. Hasler y James A. Larsen, se exponen los mecanismos por los cuales los salmones son capaces de encontrar las aguas donde nacieron y completar así su ciclo biológico. Al abordar la localización eléctrica en los peces, H. W. Lissmann estudia fundamentalmente la especie *Gymnarchus niloticus;* describe sus órganos eléctricos y el significado funcional de los mismos. R. Igor Garnow y John F. Harris, en su trabajo sobre los receptores de infrarrojos en las serpientes, dan cuenta de su estructura y empleo para detectar a sus presas. Arnald R. Griffin nos enseña el radar de los murciélagos, mecanismo para localizar objetos por ecolocación y capacidad para identificar los sones emitidos por cada individuo de los emitidos por todos los demás integrantes de la colonia; esos mamíferos discriminan incluso los ecos que se debilitan en un factor 2000 respecto a los sonidos emitidos. John T. Emlen y Richard L. Penney se ocupan de la orientación de los pingüinos.

El capítulo séptimo, "Hormonas y regulación del medio interno", se inicia con una puesta al día del tema. Roger Guillemin y Rogers Burgers, al describir las hormonas del hipotálamo, insisten en la coordinación que existe entre el hipotálamo y la hipófisis. Richard J. Wurtman y Julius Axelrold escriben sobre la glándula pineal, verdadero reloj biológico que controla la actividad de las glándulas sexuales. Howard Rasmussen y Maurice M. Pechet ponen de relieve el papel de la calcitonina, hormona que evita el aumento excesivo de los niveles de calcio en sangre. Por fin, T. G. Taylor reconstruye la estructura y síntesis de la cáscara del huevo.

En el octavo y último capítulo, "Comunicación entre Vertebrados", la introducción analiza los olores en los peces y en los conejos y el canto en las aves, con lo que facilita la comprensión de las cuatro publicaciones científicas que se engloban en este capítulo. John T. Todd descifra el lenguaje químico de los peces. Roman Mykytowycz destaca la importancia de las feromonas en el comportamiento de los conejos y otros animales. Crawford H. Greenewalt interpreta el canto de las aves, desentraña el órgano cantor, la siringe, y la fisiología y acústica de la vocalización de las aves. W. H. Thorpe cierra capítulo y obra con un artículo sobre las aves que cantan a dúo. (J. N.)

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

LAS AREAS OCEANICAS MAS PRODUCTIVAS

UPWELLING. R. L. Smith, dirigido por H. Barnes en *Oceanography and Marine Biology. Annual Review;* vol. 6, págs. 11-46; 1968.

ANÁLISIS DE SISTEMAS DE AFLORAMIENTO. Varios en *Investigación pesquera,* vol. 35 (1); 1971.

UPWELLING ECOSYSTEMS. Dirigido por R. Boje y M. Tomczac. Springer Verlag, Berlín; 1978.

LA SUPERFICIE DE VENUS

MAPPING OF PLANETARY SURFACES BY RADAR. Tor Hagfors y Donald B. Campbell en *Proceedings of the IEEE,* vol. 61, n.º 9, págs. 1219-1225; septiembre, 1973.

PHYSICAL PROPERTIES OF THE PLANETS AND SATELLITES FROM RADAR OBSERVATIONS. G. H. Pettengill en *Annual Review of Astronomy and Astrophysics,* vol. 16, págs. 265-292; 1978.

MICROTUBULOS

CYTOPLASMIC MICROTUBULES AND THEIR FUNCTIONS. Keith R. Porter en *Ciba Foundation Symposium: Principles of Biomolecular Organization,* dirigido por G. E. W. Wolstenholme y Maeve O'Connor. Little, Brown and Company, 1966.

MICROTUBULES AND MICROTUBULE INHIBITORS: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MICROTUBULES AND MICROTUBULE INHIBITORS. Dirigido por M. Borgers y M. De Brabander. American Elsevier Publishing Company, 1975.

THE BIOLOGY OF CYTOPLASMIC MICROTUBULES. Dirigido por David Soifer. *Annals of the New York Academy of Sciences,* vol. 253; 1975.

CELL MOTILITY. Dirigido por Robert Goldman, T. Pollard y J. Rosenbaum. Cold Spring Harbor Laboratory, 1976.

MICROTUBULES. Pierre Dustin. Springer-Verlag, 1978.

THE EVOLUTIONARY ORIGIN AND PHYLOGENY OF MICROTUBULES, MITOTIC SPINDLES AND EUKARYOTE FLAGELLA. T. Cavalier-Smith en *Bio Systems,* vol. 10, n.º 1, 2, págs. 93-114; abril, 1978.

CONTROL OF MICROTUBULE ASSEMBLY *IN VIVO*. Elizabeth C. Raff en *International Review of Cytology,* vol. 59, págs. 1-96; 1979.

LA PLACENTA

GLUCOSE METABOLISM VIA THE PENTOSE PHOSPHATE PATHWAY RELATIVE TO CELL REPLICATION AND IMMUNOLOGICAL RESPONSE. Peter Beaconsfield, Jean Ginzburg y Z. Kosinski en *Nature,* vol. 205, n.º 4966, págs. 50-51; 2 de enero de 1965.

THE METABOLISM OF THE PLACENTA. A. J. Szabo y R. D. Grimaldi en *Advances in Metabolic Disorders,* vol. 4, págs. 185-222; 1970.

THE HUMAN PLACENTA. James D. Boyd y William J. Hamilton. Macmillan, Inc., 1974.

PLACENTA-A NEGLECTED EXPERIMENTAL ANIMAL. Peter Beaconsfield y Claude Villee. Pergamon Press, 1979.

SYMPOSIUM ON MATERNAL RECOGNITION OF PREGNANCY. Ciba Foundation Symposium, n.º 64. Excerpta Medica, 1979.

EL ELECTRON AISLADO

THE *g* FACTOR OF THE ELECTRON. H. R. Crane en *Scientific American*, vol. 218, n.º 1, págs. 72-85; enero, 1968.

THE CURRENT STATUS OF THE LEPTON *g* FACTORS. A. Rich y J. C. Wesley en *Reviews of Modern Physics,* vol. 44, n.º 2, págs. 250-283; abril, 1972.

HIGH MASS RESOLUTION WITH A NEW VARIABLE ANHARMONICITY PENNING TRAP. R. S. Van Dyck, Jr., D. J. Wineland, P. A. Ekstrom y H. G. Dehmelt en *Applied Physics Letters,* vol. 28, n.º 8, págs. 446-448; 15 de abril de 1976.

ANTECEDENTES DE LA CIVILIZACION DEL VALLE DEL INDO

LA CIVILISATION DE L'INDUS ET SES ÉNIGMES. Jean-Marie Casal. Librairie Arthème Fayard, 1969.

THE ROOTS OF ANCIENT INDIA. Walter A. Fairservis, Jr. University of Chicago Press, 1975.

ANCIENT CITIES OF THE INDUS. Dirigido por Gregory Possehl. Carolina Academic Press, 1979.

SOUTH ASIAN ARCHAEOLOGY 1977. Dirigido por Maurizio Taddei. Istituto Universitario Orientale, Seminario di Studi Asiatici, Nápoles, 1979.

TECNOLOGIA DE LAS MEMORIAS DE DISCO

DIGITAL MAGNETIC RECORDING. Albert S. Hoagland. John Wiley & Sons, Inc., 1963.

A NEW CLASS OF DIODE LASERS. Morton B. Panish e Izuo Hayashi en *Scientific American,* vol. 225, n.º 1, págs. 32-30; julio, 1971.

IBM JOURNAL OF RESEARCH AND DEVELOPMENT, vol. 18, n.º 6; noviembre, 1974.

COMPUTER STORAGE SYSTEMS AND TECHNOLOGY. Richard E. Matick. John Wiley & Sons, Inc., 1977.

LA MANZANA DE NEWTON Y EL DIALOGO DE GALILEO

UNPUBLISHED SCIENTIFIC PAPERS OF ISAAC NEWTON: A SELECTION FROM THE PORTSMOUTH COLLECTION OF THE UNIVERSITY LIBRARY, CAMBRIDGE. A. Rupert Hall y Marie Boas Hall. Cambridge University Press, 1962.

THE BACKGROUND TO NEWTON'S PRINCIPIA: A STUDY OF NEWTON'S DYNAMICAL RESEARCHES IN THE YEARS 1664-84. John Herivel. Oxford University Press, 1965.

JUEGOS MATEMATICOS

THE PIGEONHOLE PRINCIPLE: "THREE INTO TWO WON'T GO." Richard Walker en *The Mathematical Gazette,* vol. 61, n.º 415, págs. 25-31; marzo, 1977.

EXISTENCE OUT OF CHAOS. Sherman K. Stein en *Mathematical Plums: the Dolciani Mathematical Expositions, No. 4,* dirigido por Ross Honsberger. The Mathematical Association of America, 1979.

THE PIGEONHOLE PRINCIPLE. Kenneth R. Rebman en *The Two-Year College Mathematics Journal,* edición bufa, págs. 4-12; enero, 1979.

TALLER Y LABORATORIO

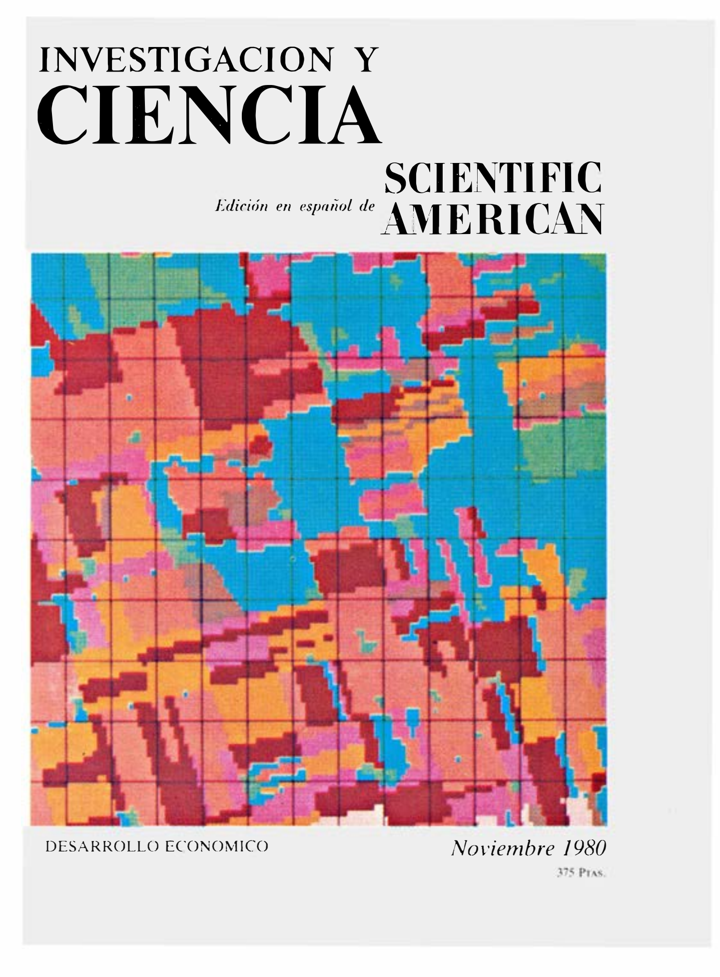
OPTICAL SPECTRUM ANALYSIS. Arnold Roy Schulman en *Optical Data Processing.* John Wiley & Sons, Inc., 1970.

FUNDAMENTALS OF OPTICS. Francis A. Jenkins y Harvey E. White. McGraw-Hill Book Company, 1976.

LASER ART & OPTICAL TRANSFORMS. T. Kallard. Optosonic Press, 1979.

EL PROXIMO NUMERO, EXTRAORDINARIO Y MONOGRAFICO, ESTARA DEDICADO AL DESARROLLO ECONOMICO

¿QUE PAPEL ASIGNAR A LA TECNOLOGIA CIENTIFICA E INDUSTRIAL EN EL AVANCE HACIA UN NUEVO ORDEN ECONOMICO INTERNACIONAL? EL AGOTAMIENTO DE LOS RECURSOS ENERGETICOS Y EL EMPOBRECIMIENTO CRECIENTE DE LOS PAISES SUBDESARROLLADOS PLANTEAN UN RETO DIFICIL A LA INVESTIGACION Y A LA JUSTICIA.



DESARROLLO ECONOMICO, por K. K. S. Dadzie
Las naciones subdesarrolladas están forzando la creación de un nuevo orden económico.

DESARROLLO ECONOMICO DE MEXICO, por Pablo González Casanova
México es un país cuyo desarrollo está muy desequilibrado.

LA ECONOMIA MUNDIAL EN EL AÑO 2000, por Wassily W. Leontief
El modelo "input - output" de la economía mundial puede reducir distancias entre países ricos y países pobres.

ALIMENTACION, por Nevin S. Scrimshaw y Lance Taylor
Para abastecer adecuadamente a todo el mundo habría que invertir más de 10 billones de dólares en agricultura.

ENERGIA, por Wolfgang Sassin
El crecimiento futuro en la demanda mundial de energía vendrá principalmente de los países menos desarrollados.

AGUA, por Robert P. Ambroggi
El suministro adecuado depende de la intervención humana en los recursos hidráulicos.

POBLACION, por Halfdan Mahler
"Salud para todos" no es sólo un lema electoral, sino la palanca que impulsa el desarrollo.

LOS DETERMINANTES DEL CRECIMIENTO ECONOMICO, por Alfonso Carbajo y Luis A. Rojo
El crecimiento económico constituye un proceso tan complejo y de tan múltiples facetas que excede el ámbito de la economía.

DESARROLLO ECONOMICO DE CHINA, por Ding Chen
Una cuarta parte de la humanidad parece estar a salvo del hambre y de las epidemias.

DESARROLLO ECONOMICO DE LA INDIA, por Raj Krishna
Aunque posee el mayor índice de pobreza, se han conseguido avances en industrialización y modernización de la agricultura.

DESARROLLO ECONOMICO DE TANZANIA, por Robert B. Mabele, William M. Lyakurnsa, Beno J. Ndulu y Samuel M. Wangwe.
Un país pobre, preparado para convertirse en un estado industrial moderno.

